

# PPGEAS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

## Últimas defesas

Confira as últimas defesas de mestrado e doutorado de alunos do PGEAS

**P. 56**

## Time do PPGEAS

Conheça a trajetória do professor do PPGEAS Eugênio de Bona Castelan Neto

**P. 64**

## Números do PPGEAS

Confira os últimos números do PPGEAS para a próxima avaliação da CAPES

**P. 58**

## Participações em eventos

Nosso programa não para! Confira as participações em eventos de docentes e alunos.

**P. 76**

# Petróleo e Gás



## Equipe

### • Comissão editorial

Enio Snoeijer

Felipe Cabral

Julio Normey-Rico

Livia Scheffer

### Histórico de coordenações

- Eugênio B. Castelan / Edson R. De Pieri (2007 - 2010);
- José E. R. Cury / Eugênio B. Castelan (2010 - 2012);
- Jomi Fred Hübner / José E. R. Cury (2012- 2014);
- Rômulo S. de Oliveira/ Jomi Fred Hübner (2014-2016);
- Daniel F. Coutinho / Rômulo S. de Oliveira (2016 - 2018);
- Werner Kraus Junior / Jomi Fred Hübner (2018 - 2020);
- Werner Kraus Junior / Jomi Fred Hübner (2020-2022).

## Conteúdo

### 5



#### Pesquisas em Petróleo e Gás

Conheça as iniciativas do PPGEAS na área de engenharia em Petróleo e Gás Natural.

### 58



#### Avaliação do PPGEAS

Conheça os números do PPGEAS para a próxima avaliação da CAPES.

### 64



#### Time PPGEAS

Conheça a trajetória do Prof. Eugênio de Bona Castelan Neto

O número 3 da Revista do Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas (PPGEAS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) traz, como tema central, as pesquisas realizadas no PPGEAS em “Processos da Indústria do Petróleo e Gás Natural”. Esse assunto é de grande relevância pelo seu impacto no desenvolvimento científico e econômico do país, já que o setor de petróleo e gás natural é responsável por mais de 10% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, além do que uma quantidade importante de recursos é injetado, anualmente, nas universidades que realizam pesquisas direcionadas ao setor, as quais formam recursos humanos para a indústria de petróleo e gás natural. Vários pesquisadores do PPGEAS têm participado ou participam de projetos na área, e nesta edição, trazemos um panorama geral dos resultados gerados nos estudos e pesquisas.

Você sabia que o PPGEAS é considerado um programa de destaque na sua área de atuação no cenário nacional? Que tem uma nota 6 (máximo 7) na avaliação quadrienal realizada pela CAPES? Então, neste número trazemos uma matéria que mostra o porquê dessa nota, resumindo os resultados mais importantes obtidos pelo nosso programa em termos de produção científica e acadêmica, assim como na formação de mestres e doutores nos últimos anos.

Na nossa série “Conhecendo o time do PPGEAS”, vamos conhecer um pouco da trajetória acadêmica, profissional e experiências de vida de um dos docentes mais experientes do programa.

Finalmente, como é já uma tradição na revista, você também confere, nesta edição, as últimas notícias das atividades realizadas pelos discentes e docentes no último semestre. Fica, ainda, por dentro dos resultados das pesquisas por meio das teses e dissertações defendidas e muito mais!

Boa leitura! Equipe Revista PPGEAS.

# Pesquisas em

# Petróleo

# & Gás

O Brasil tem se consolidado como referência em tecnologias de petróleo e gás natural. Nesta edição conferimos as últimas pesquisas do PPGEAS no tema.

**Autores:** Prof. Julio Elias Normey-Rico e Prof. Rodolfo César Costa Flesch

A indústria do petróleo e gás (P&G) é, sem dúvida, um setor de grande importância para o Brasil, tanto pela sua participação no Produto Interno Bruto (PIB) como pelo número de empregos gerados e pelos investimentos que se realizam anualmente em pesquisas no setor. Nos últimos anos, a indústria do petróleo e gás tem representado mais de 10% do PIB nacional e hoje temos quase 100 grupos econômicos atuando no Brasil em atividades de exploração e produção, que empregam aproximadamente 50 mil pessoas.

Em termos de reservas e produção, o Brasil, em 2020, estava na 16ª posição no ranking mundial de reservas de petróleo, na 33ª posição no ranking de reservas de gás natural, era o 10º maior produtor de petróleo e o 31º maior produtor de gás natural. Ainda, nossa produção de petróleo tem uma previsão de crescimento de 4,2% para o período 2020-2024 [1, 2].

Em termos de pesquisa, de acordo com dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), o setor de óleo e gás contribuiu com aproximadamente 16,3 bilhões de reais nos últimos 20 anos para pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Estes recursos são oriundos de uma cláusula nos contratos de exploração e produção que obriga as empresas do setor a aplicar em PD&I um percentual da receita bruta da produção. Uma parte desses recursos é destinada a projetos com as universidades e centros de pesquisa cadastrados e credenciados pela ANP. A UFSC é uma das instituições credenciadas, com 37 grupos de pesquisa cadastrados e atuando no setor.

Mas qual é a situação atual e quais são as perspectivas para o setor? Estamos vivendo uma situação de transição para um futuro no qual as energias renováveis, também chama-

das de fontes de baixo carbono, passarão a ter mais representatividade nas matrizes energéticas mundial e nacional. Hoje, no mundo, as energias renováveis têm uma participação de 14% na matriz energética global e são responsáveis por 27% da geração de eletricidade. Apesar dos números ainda não tão expressivos, essas fontes vêm apresentando importantes crescimentos nos últimos anos e a expectativa é que se tornem as principais fontes de energia até 2025, em substituição ao carvão. No Brasil, a participação de fontes renováveis na matriz energética global chega a 45% e são responsáveis por 83% da geração de eletricidade, devido principalmente à grande participação da energia hidrelétrica e da biomassa. Entretanto, as previsões mostram que os combustíveis fósseis terão, ainda, uma grande participação (próxima de 75%) no atendimento da demanda de energia global do planeta até 2040 [1–4]. Assim, o setor de petróleo e gás ainda será um protagonista importante nos próximos anos, tanto no mundo como no Brasil, que atende aproximadamente 34% da sua demanda energética com derivados do petróleo, considerando dados de 2019. Dado este panorama, as empresas do setor estão investindo em várias frentes, sendo uma das principais a melhoria dos processos produtivos, para a qual as pesquisas realizadas nas universidades têm grande importância.

Controle, automação, instrumentação e otimização estão intimamente ligados para permitirem o aumento da receita proveniente do aproveitamento ótimo do potencial dos campos de petróleo e dos processos e operações realizadas para a exploração, a distribuição e o tratamento dos diversos subprodutos. No cenário predominante no Brasil, com reservatórios em águas profundas e ultraprofundas, um gerenciamento efetivo de reservatório ganha complexidade, dado que a intervenção em poços através de sondas é muito

custosa ou mesmo inviável. Nesse caso, a opção mais econômica é realizar a intervenção remotamente, a partir da plataforma de produção, o que necessita de alto grau de automação. O uso de técnicas de otimização e de automação dos processos de injeção de água, vapor e gás em poços, por exemplo, consegue maximizar a produção de óleo e, ao mesmo tempo, obter a redução de custos operacionais. A ampliação do grau de automação dos equipamentos permite determinar recomendações de produção de forma cada vez mais rápida, o que leva a tomadas de decisão com agilidade e aumento de segurança operacional.

O PPGEAS vem participando do processo de modernização e automatização das diversas fases do ciclo de exploração, produção e refino do petróleo, realizando pesquisas em diversos temas, na maioria dos casos, em parcerias com empresas ou outras universidades. Estas pesquisas têm gerado resultados importantes em várias linhas, como na formação de recursos humanos para o setor, no desenvolvimento de protótipos, na criação de *startups*, na implantação de novas metodologias ou procedimentos para melhora dos processos produtivos e na publicação de artigos técnicos no tema.

Esta matéria pretende mostrar, de forma resumida, alguns dos trabalhos realizados nos últimos anos no PPGEAS com a participação de docentes e discentes. Muitos dos estudos são (ou foram) realizados no escopo de projetos de pesquisa e formação de recursos humanos desenvolvidos dentro do PPGEAS e do Departamento de Automação e Sistemas (DAS). Estes projetos trazem recursos para financiar a contratação de bolsistas de pós-doutorado, doutorado, mestrado e graduação, assim como permitir a montagem de laboratórios.

## Projetos de pesquisa em P&G desenvolvidos e em andamento no PPGEAS

**Projeto: Ferramentas de Monitoramento e Quantificação da Depleção de Massa de Hidrocarbonetos de Petróleo em Fontes de Contaminação para o Apoio no Encerramento de Casos de Contaminação.**

Objetivo: desenvolver um sistema automático de medição de características do solo e um modelo matemático que permitam estimar a taxa de biodegradação de hidrocarbonetos em casos de desastres ambientais.

**Projeto: Validação de Sistemas de Controle e Automação na Indústria do Petróleo e Gás Utilizando Métodos de Teste, Verificação e Síntese de Programas.**

Objetivo: desenvolver métodos de teste caixa-preta, de verificação formal e de síntese de controle a eventos discretos que permitam validar sistemas de controle e automação na indústria de petróleo e gás, com foco nos Sistemas Instrumentados de Segurança de unidades de produção *offshore*, buscando a operação segura e em conformidade com as especificações de projeto.

**Projeto: Medidor das Frações de Água-óleo-gás Baseado em Tomometria Elétrica Capacitiva para Escoamentos Multifásicos na Indústria de Petróleo 4.0**

Objetivo: desenvolver um medidor industrial, com eletrônica embarcada, para medir as frações de água-óleo-gás em escoamentos multifásicos, desde o poço até a unidade de produção de petróleo, baseado em tecnologia de processo e na integração de diferentes técnicas de medição por Tomometria Elétrica Capacitiva (*Electrical Capacitance Tomometry – ECTM*).

**Projeto: Desenvolvimento de Algoritmos de Controle Preditivo Não Linear e de Avaliação de Desempenho de Controladores Preditivos para Plataformas de Produção de Petró-**

## leo (Fases 1 e 2)

Objetivo: desenvolver estratégias de controle avançado para plataformas de produção utilizando algoritmos de controle preditivo linear e não linear, considerando objetivos econômicos conjuntamente com os de desempenho dinâmico.

### Projeto: Estratégias para Otimização Estática e Dinâmica de Sistemas Marítimos Complexos de Produção de Óleo e Gás

Objetivo: desenvolver modelos e projetar algoritmos para otimização matemática da produção de plataformas marítimas, em contextos unitários e integrados em bacias produtoras.

### Projeto: Medidor de Fração de Água (*water-cut meter*) Baseado em Cavidade Ressonante de Radiofrequência para Escoamentos Multifásicos na Indústria de Petróleo

Objetivo: desenvolver um medidor industrial baseado em cavidade ressonante de rádio frequência (RF), com eletrônica embarcada, para medir a fração de água (*water-cut meter*) em escoamentos multifásicos de unidades de produção de petróleo.

### Projeto: Desenvolvimento de Ferramenta para Determinação da Área de Poço Formada na Superfície do Solo a partir de Vazamentos de Hidrocarbonetos Líquidos em Dutos Enterrados

Objetivo: desenvolver e avaliar experimentalmente um modelo matemático que permita estimar a área de empoçamento de hidrocarbonetos em solo em caso de rompimento de dutos subterrâneos.

## Projetos de formação de recursos humanos em P&G no PPGEAS—UFSC

O Programa de Formação de Engenheiros em Automação, Controle e Instrumentação para Petróleo, Gás e Biocombustíveis, criado em 2001 sob a denominação de PRH 34 (2001-2018) e na sua nova fase PRH 2.1 (desde 2021), é financiado pela Agência Nacional de

Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) e gerido pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

O Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP) foi implantado pela ANP em 1999, com o objetivo de incentivar a formação de mão de obra especializada em áreas estratégicas e imprescindíveis ao desenvolvimento do setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis.

O PRH 34 (com sigla PRH34/aciPG) foi criado com o objetivo de complementar a formação de Engenheiros, nos níveis de graduação e pós-graduação, para atuação nas áreas de Automação, Controle e Instrumentação no setor de Petróleo e Gás Natural. Como tratava de uma problemática de caráter eminentemente multidisciplinar, diversos departamentos, cursos e laboratórios da UFSC participaram das atividades, que foram coordenadas por professores do PPGEAS, o prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, o prof. Daniel Juan Pagano, o prof. Julio Elias Normey-Rico e o prof. Rodolfo César Costa Flesch.

Em sua nova fase, o PRH 2.1 abrange os conhecimentos e princípios do PRH 34, ao mesmo tempo que abre o seu campo de pesquisa e desenvolvimento para o trabalho com energias renováveis, adequando-se às novas necessidades do mercado. Os pesquisadores que atuam no programa têm forte e longa atuação no setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis, iniciada, no caso de alguns professores, há mais de 25 anos. O PRH34/aciPG formou 57 alunos de graduação, 27 alunos de mestrado e 10 de doutorado, responsáveis por mais de 200 publicações em periódicos e congressos. O programa conquistou excelência na área, sendo classificado como um dos melhores do Brasil pela ANP e, em 2003, ocupou o primeiro lugar da avaliação realizada pela ANP.

O PRH 2.1 hoje é coordenado pelo prof. Rodolfo César Costa Flesch do PPGEAS e

conta com a participação de vários docentes do programa, que orientam dissertações de mestrado, teses de doutorado e estágios de pós-doutorado. Como a retomada do PRH ocorreu há pouco mais de um ano, o PRH 2.1 ainda está em fase de reaceleração. Mesmo assim, há atualmente oito estudantes de pós-graduação atuando no PPGEAS com bolsa do PRH 2.1. A previsão é que o PPGEAS possa contar com, ao menos, seis bolsas de mestrado, quatro bolsas de doutorado e uma bolsa de pós-doutorado do PRH 2.1 de forma simultânea.

## Entendendo o processo

### Do reservatório até os produtos finais

O petróleo é uma substância orgânica formada principalmente por carbono e hidrogênio, com impurezas como nitrogênio, enxofre e oxigênio. O petróleo é encontrado em reservatórios que são, normalmente, rochas sedimentares que acumulam o petróleo ao longo do tempo. A busca por acumulações de petróleo é a parte do processo chamado de exploração. Uma vez localizado o reservatório e confirmada a viabilidade de extração do petróleo, inicia-se a construção de toda a infraestrutura necessária para extraí-lo. O reservatório pode estar em terra ou no mar. Assim, toda a infraestrutura pode ser

construída em uma estação terrestre, chamada *onshore*, ou em uma plataforma marítima, denominada *offshore*.

No Brasil, a produção é majoritariamente oriunda de reservatórios marítimos. Nesses casos, a extração é realizada com uma instalação como a ilustrada na Figura 1. Além da instalação em si, a figura apresenta o reservatório (na parte inferior) e o fundo do leito marinho.

O petróleo é levado do reservatório até a plataforma, localizada sobre a superfície da água, através da coluna de produção do poço, da *flowline* (tubulação posicionada sobre o leito do mar) e do *riser* (tubulação que leva a produção do leito do mar até a superfície). Para extrair o petróleo do reservatório e conduzi-lo até a superfície ou até a plataforma, é geralmente necessário usar alguma estratégia de elevação artificial nos poços produtores. Na figura se mostra uma delas, conhecida como de injeção de gás (*gas-lift*). Nesse tipo de estratégia, um gás pressurizado oriundo da plataforma é enviado para o fundo do mar através de uma tubulação exterior à do poço, denominada anular, e é injetado através de válvulas no tubo de produção, de forma a diminuir a

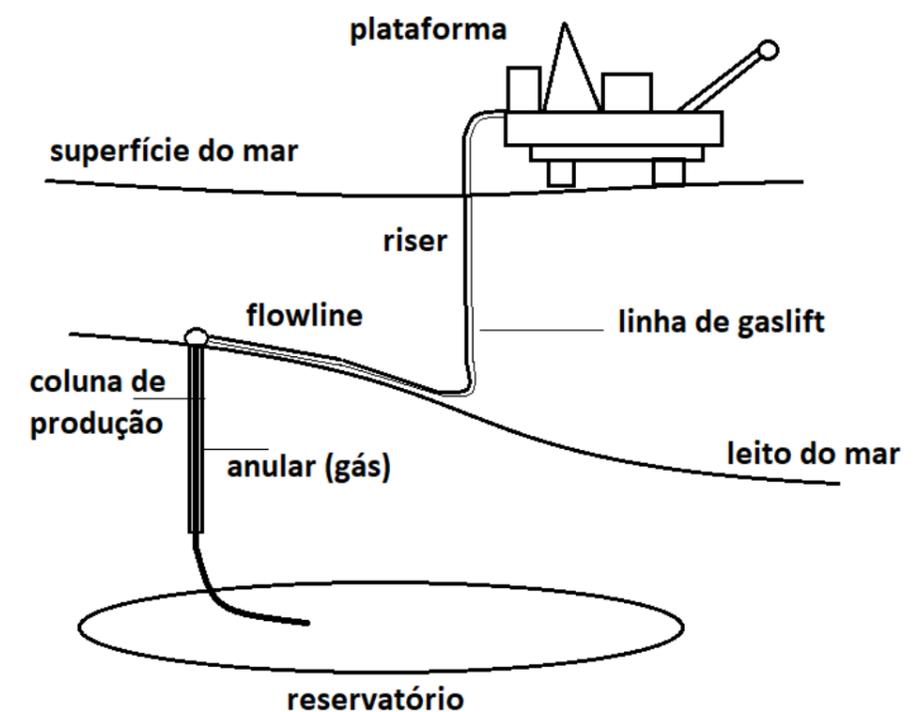


Figura 1: Esquema do reservatório, poço e linha de produção até a plataforma *offshore*

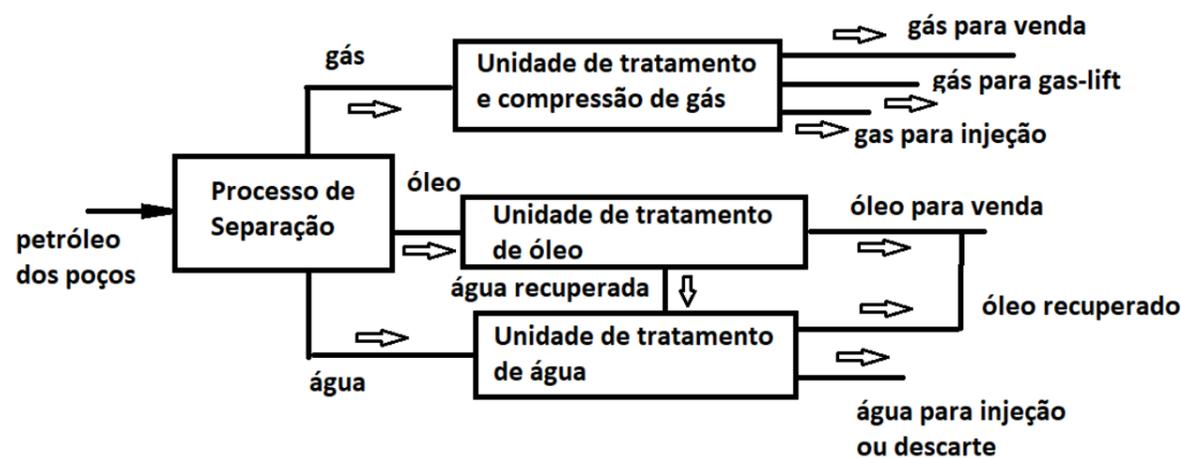


Figura 2: Esquema de funcionamento de uma plataforma, com as unidades de separação, tratamento de água, tratamento de óleo e compressão e tratamento de gás.

densidade do fluido que está sendo extraído e permitir que a pressão do reservatório seja suficiente para elevá-lo até a plataforma. O gás usado para este processo é parte do extraído do reservatório e seu processamento se dá nas unidades instaladas na plataforma, como se descreve na sequência.

Na plataforma, o petróleo recebido, que é uma mistura de óleo, gás e água, deve ser processado para separar as três fases e tratá-las adequadamente. Normalmente, as plataformas são compostas por um sistema de separação trifásico que recebe a produção dos poços, um sistema de tratamento de óleo e água e um sistema de compressão de gás, como se mostra no esquema da Figura 2.

O separador trifásico opera por gravidade e aproveita a diferença de densidade para separar a fase líquida mais densa (água) da fase líquida menos densa (óleo) e do gás. Para isso, utilizam-se grandes tanques horizontais que possuem sistemas de controle de nível, vazão e pressão, permitindo a correta separação das três fases. Esse sistema não consegue separar perfeitamente os três componentes básicos do fluido que chega dos poços. Assim, são necessárias unidades de tratamento de cada uma das fases.

O sistema de tratamento de água deve limpar a água processada, de forma que o óleo e outros resíduos sejam eliminados antes que a água seja devolvida ao mar ou reinjetada no reservatório em poços de injeção. Após a sepa-

ração, o óleo também pode ter uma quantidade indesejável de água, que é removida no sistema de tratamento de óleo. Finalmente, um sistema de compressão de gás é responsável por aumentar a pressão do gás do separador, fornecendo vazão de gás em uma pressão, umidade e temperatura específicas, de acordo com o ponto de operação desejado e as especificações dos sistemas subsequentes. O gás comprimido pode, então, ser enviado para venda, reinjetado no reservatório ou usado em processos da própria plataforma, como no sistema de elevação artificial *gas-lift* e geração de energia elétrica. Quando o gás e a água são reinjetados no reservatório, o objetivo é melhorar a recuperação do óleo do reservatório, em um método denominado de recuperação secundária. No reservatório, são instalados tanto poços produtores como poços injetores. Os primeiros são usados para extrair o petróleo, enquanto os segundos são usados para manter a pressão do reservatório em níveis que facilitem a extração e para deslocar o óleo do reservatório para a região onde se instalam os poços produtores.

Como comentado, os dois produtos de interesse obtidos na plataforma são o óleo e o gás, que podem ser então enviados para as unidades de armazenamento em terra via oleodutos e gasodutos ou por navios. No caso das plataformas próximas da costa, a primeira opção é a mais interessante. Por outro lado, quando as plataformas estão muito afastadas da costa, em geral, apenas o óleo produzido é transportado e o gás é usado na própria plata-

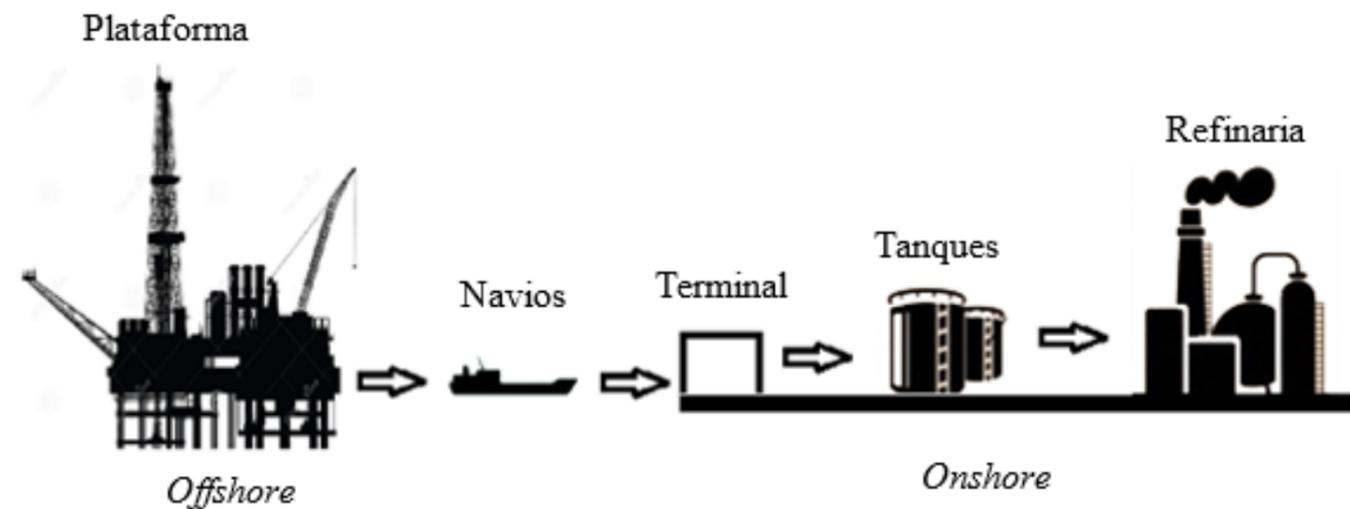


Figura 3: Esquema do sistema de transporte e armazenamento do óleo até chegar na refinaria.

forma ou re-injetado no reservatório. A Figura 3 mostra um esquema do sistema de transporte, armazenamento e envio da produção para a refinaria.

Conforme ilustrado na Figura 3, as embarcações transferem o óleo das unidades *offshore* de águas profundas para terminais *onshore*, descarregando através de um oleoduto para tanques de armazenamento. Os navios transportam diferentes tipos de óleo, dado que o produto pode vir de diferentes reservatórios. Assim, nestes primeiros tanques, o armazenamento se dá com misturas. Tanques de carga então são usados como elementos intermediários para alimentar, de forma contínua e mais uniforme, as unidades de destilação do óleo bruto instaladas nas refinarias. Nas refinarias, o óleo bruto é processado para remover impurezas e quebrar as cadeias de hidrocarbonetos para produzir os denominados derivados do petróleo, como asfalto, gasolina, gasolina de aviação, gás liquefeito de petróleo (GLP), lubrificantes, nafta, óleo diesel, querosene, querosene de aviação, entre outros. Para termos uma ideia do volume de derivados produzido no Brasil, em 2019, a produção chegou a aproximadamente 105 milhões de metros cúbicos, sendo que o óleo diesel representa aproximadamente 40% desse total [1].

Como podemos observar nesta breve explicação da cadeia produtiva do petróleo, que não considera todo o setor petroquímico, o processo envolve uma grande quantidade de

unidades de processamento que exigem o controle de muitas variáveis e a otimização de diversos procedimentos. Assim, sistemas de medição sofisticados, sistemas de controle e automação em diferentes níveis, estratégias de otimização e plataformas de software são elementos fundamentais para o correto funcionamento de todo o processo produtivo.

O PPGEAS tem atuado de forma contínua, em parceria com o setor produtivo, realizando pesquisas e estudos nas áreas de controle, instrumentação, automação, engenharia de software e otimização, buscando o aprimoramento dos processos e melhoria dos sistemas de produção. Vários desses trabalhos são apresentados nas próximas páginas desta edição. Aproveite a leitura!

#### Referências

- [1] VIANA, Fernando Luiz E. **Petróleo e gás natural**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 5, n. 145, dez. 2020. (Caderno Setorial ETENE)
- [2] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Reservas brasileiras**. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/tags/reservas/>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2021 (ano base 2020)**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2020: Renewable electricity**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/renewable-electricity-2>. Acesso em: 16 ago. 2021.

# Controle avançado de estações de compressão de gás em plataformas de produção de petróleo offshore.

**Autores:** Daniel M. Lima, Leandro B. Becker, Julio E. Normey-Rico

Esta pesquisa focou no estudo de sistemas de controle avançado para estações de compressão de gás (ECG) de plataformas de produção de petróleo offshore. O projeto foi desenvolvido em parceria com a Petrobras e teve a participação de vários estudantes de mestrado, egressos, e professores do PPGEAS.

## Funcionamento da ECG e problemática

A estação de compressão de gás é uma unidade fundamental da plataforma; ela é responsável por aumentar a pressão do gás que chega do separador, proporcionando uma vazão de gás a uma pressão, umidade e temperatura específicas, de acordo com o ponto de operação desejado e as especificações dos sistemas subsequentes. O gás comprimido pode ter diferentes destinações: (i) enviado para a venda através de gasodutos, (ii) injetado nos poços para controlar a produção de óleo (técnica denominada de *gas-lift*), (iii) usado para gerar energia elétrica em usinas térmicas

instaladas na plataforma, (iv) reinjetado no reservatório em poços de injeção. A Figura 1 mostra um esquema básico de uma ECG, mostrando a chegada do gás do separador e as diferentes utilizações. Como pode ser visto, além dos elementos mencionados, existe uma unidade de queima de gás, que é unicamente acionada quando a ECG não consegue processar todo o gás que chega do separador. Essa sobra de gás não pode ser liberada na atmosfera e deve ser queimada.

Uma ECG é normalmente composta por equipamentos como compressores, trocadores de calor, tanques e *manifolds*. Os principais componentes da ECG são os compressores (centrífugos) responsáveis por aumentar a pressão do gás. Vários controladores locais são usados na ECG para manter pressões, temperaturas e fluxos nos níveis especificados, tentando rejeitar os efeitos dos distúr-

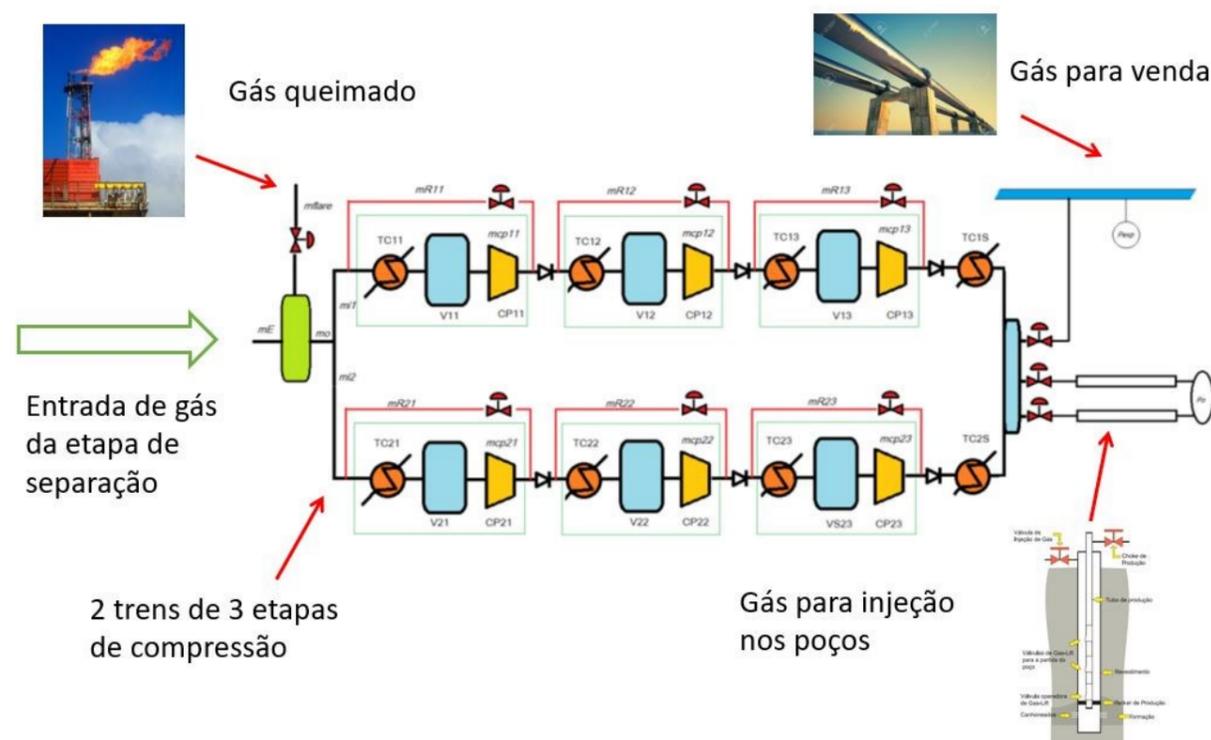


Figura 1: Esquema básico de uma ECG.

bios, causados principalmente por mudanças combinadas da taxa de fluxo de gás de entrada e propriedades do gás, como peso molecular, compressibilidade, etc., já que o petróleo que chega na plataforma vem de diferentes poços e, assim, as propriedades do gás que chega não é uniforme. A ECG utiliza geralmente vários compressores, e cada compressor é composto por vários estágios de compressão, realizando aumento parcial da pressão em cada um deles. Além disso, como as destinações são diversas, e as pressões requeridas por cada utilidade são diferentes, a ECG tem compressores específicos para cada uma delas. Por exemplo, a ECG pode ter uma unidade de compressão principal, que recebe o gás do separador e unidades específicas para a venda (o termo usado na indústria é exportação), injeção e *gas-lift*. Ainda, como o gás pode ter alto teor de CO<sub>2</sub>, a ECG pode utilizar unidades para separar o gás natural do CO<sub>2</sub> e um compressor específico para comprimir o CO<sub>2</sub> antes de ser enviado para a unidade de injeção (tipicamente o CO<sub>2</sub> é reinjetado no reservatório).

Para ilustrar como cada estágio de compressão funciona (de forma simplificada) a Figura 2 mostra os elementos básicos: um vaso de entrada (chamado de *scrubber*), um elemento de compressão, uma turbina, um trocador de calor e uma linha de recirculação com uma válvula de reciclo. A pressão de sucção do compressor é controlada indiretamente através do controle da pressão do *scrubber*. Um controlador PID é usado para controlar a pressão do *scrubber* através da manipulação da rotação do compressor, acionando uma turbina acoplada ao eixo do compressor. Caso seja necessário reduzir a pressão, o controlador aciona a turbina acelerando a máquina e caso seja necessário aumentar a pressão, a máquina é desacelerada. Um controle PID também é usado para controlar a temperatura do gás na saída do compressor, atuando na vazão do líquido refrigerante (este PID não aparece na figura).

A válvula *antisurge* é acionada por outro controlador PID regulatório sempre que a vazão de gás que passa pelo compressor for mais baixa que o mínimo definido para aquele ponto de operação. *Surge* é a denominação dada para um fenômeno que acontece no

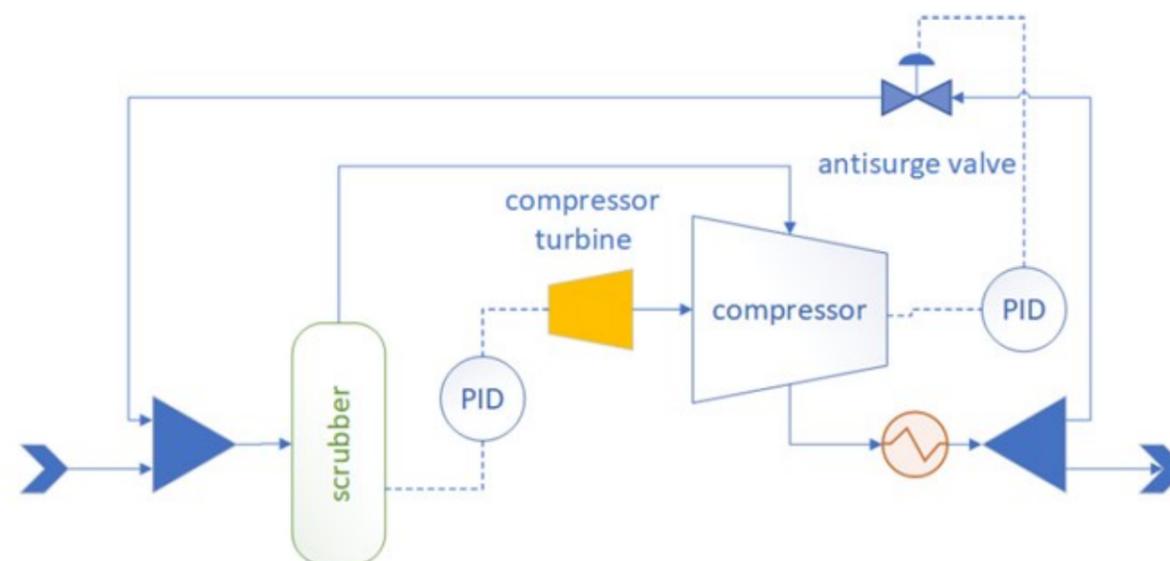


Figura 2: Esquema básico de um estágio de compressão.

compressor quando a vazão nele cai abaixo de um mínimo. O fenômeno do *surge* é característico dos compressores do tipo centrífugo e se caracteriza por meio da promoção de oscilações de fluxo de massa e pressão, capazes de promover danos estruturais na máquina. A Figura 3 mostra uma característica estática de um compressor, para uma dada rotação. A relação entre a pressão de descarga  $P_d$  e de sucção  $P_s$  do compressor depende da vazão  $Q$ , que deve ser mantida acima do valor de *surge*  $Q_s$ . Assim, o sistema de controle local *antisurge* tenta evitar que a vazão do sistema chegue ao valor crítico mínimo, recirculando parte do gás processado. Quando este controle local não atinge seu objetivo, o sistema de automação da ECG entra em ação e realiza uma parada não programada da unidade, o que acarreta grandes perdas econômicas para a plataforma, pois afeta a produção - e a venda - do gás.

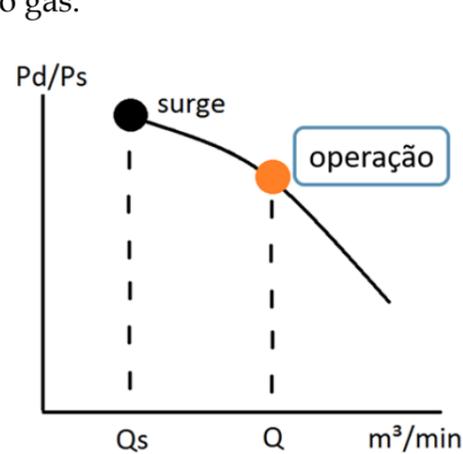


Figura 3: Característica estática do compressor.

Em condições normais de operação, poderíamos prever uma vazão de entrada na ECG uniforme, assim, estes sistemas de controle local seriam capazes de manter o sistema operando corretamente, apenas ajustando pequenas variações de pressão, temperatura, etc. Porém, no dia a dia da operação de plataformas *offshore*, o sistema da ECG é frequentemente afetado por perturbações de grande amplitude da vazão de entrada de gás. Isto se deve a um fenômeno denominado de *golfada*,

que é uma oscilação de vazão e pressão causada pelo acúmulo de líquido nas curvas das tubulações que levam o petróleo do poço até a plataforma. Esse acúmulo de líquido impede a passagem do gás e, conseqüentemente, um aumento da pressão na tubulação e uma diminuição do gás que chega na plataforma. Quando a pressão aumenta o suficiente para empurrar o líquido acumulado, uma grande quantidade de gás consegue passar e então chega na plataforma, conformando assim um ciclo de oscilações de vazão que pode se manter por algum tempo. O separador é usado na plataforma como pulmão para atenuar estas oscilações, mas elas igualmente chegam na ECG. A Figura 4 ilustra uma forma de onda dessa *golfada* e os problemas que pode causar: parada do compressor para vazões muito baixas e queima de gás para vazões muito altas.

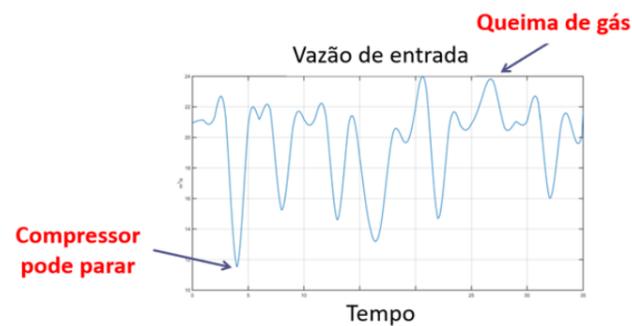


Figura 4: Forma de onda de uma *golfada* e possíveis efeitos para a ECG.

Assim, a ECG mais o conjunto de controladores locais utilizados em cada um dos equipamentos podem ser considerados como um sistema multivariável complexo, com diversos processos acoplados, dado que cada uma das etapas de processamento do gás influencia as outras. Ainda, há um número elevado de variáveis controladas associadas aos vários compressores, trocadores de calor, vasos e outros equipamentos, e a maioria destas variáveis devem ser mantidas em bandas estreitas de operação, para manter a segurança e o desempenho da ECG de acordo com o planejamento da produção. Diante disso, observa-se que os controladores locais têm uma visão

apenas local dos problemas, não conseguindo perceber os efeitos de acoplamento entre as diversas partes do processo. Por este motivo, o uso de uma estratégia de controle multivariável avançada é muito interessante para este problema. Este sistema de controle avançado atuaria em uma camada acima dos controladores locais, enviando as referências para a camada regulatória do processo composta pelos controladores locais da ECG. A Figura 5 mostra a pirâmide da automação clássica, com sua base composta pelas unidades de instrumentação e pelos controles locais que, em grande número, atuam no processo em escalas de tempo de segundos. Estas duas camadas são hoje utilizadas nas ECG das plataformas e, tipicamente, os operadores são encarregados de atualizar as referências destes controles locais para atender às especificações do planejamento da produção, que é a camada mais alta da pirâmide e cujas decisões são geralmente tomadas em uma escala de tempo de dias.



Figura 5: Pirâmide da automação.

As camadas intermediárias de otimização econômica e controle avançado, que operam em escalas de tempo de minutos a horas, são as encarregadas de traduzir de forma ótima o plano de produção para as camadas mais baixas e fazem isto considerando o processo como um todo, incluindo o acoplamento entre os diferentes subprocessos e objetivos de desempenho e econômicos.

Neste projeto de pesquisa, técnicas de controle preditivo baseado em modelo foram

usadas para projetar uma camada de controle avançado para a ECG, de forma tal a melhorar o comportamento do sistema, buscando principalmente manter o sistema funcionando próximo da região de máxima produção, evitando paradas, minimizando a queima de gás e o consumo de energia.

### Sistema de controle proposto

O controlador proposto para este problema foi um controle preditivo multivariável (CPM) que considerasse na sua função objetivo todas as especificidades do problema de controle da ECG, levando em conta as variáveis disponíveis para medição e atuação na plataforma. O CPM toma as decisões com uma visão global da ECG, e atua enviando referências a vários dos controladores PID da unidade. Durante o projeto várias formulações foram estudadas, considerando modelos não lineares completos da ECG e modelos lineares simplificados, sempre ajustados com base em dados reais de operação e dados dos fabricantes dos diversos equipamentos. Ainda, diversos objetivos de controle foram estudados, alguns considerando aspectos econômicos, como a maximização da produção e minimização da energia consumida e outros apenas levando em conta a manutenção do processo na região de operação para o qual for projetado. Na sequência uma dessas estratégias é detalhada.

A estratégia de controle CPM é ilustrada no diagrama da Figura 6. O controlador usa um modelo explícito do processo dentro da sua estrutura para calcular a predição do comportamento futuro do processo em uma janela de tempo futura. Com base nessa predição, em um conjunto de referências para as variáveis controladas e um conjunto de restrições, um otimizador encontra os valores das ações de controle a serem aplicadas no processo (também numa janela de tempo futura)

de forma tal a minimizar uma dada função objetivo.

A cada amostra o controlador aplica o primeiro sinal de controle calculado dessa sequência futura e recebe a saída atual do processo, para repetir todo o procedimento no próximo instante de amostragem, configurando o que se denomina estratégia de horizonte deslizante.

A função objetivo estudada neste caso foi:

$$J = \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=1}^{N_p} \delta_{ij} (y_i(k+j) - \bar{y}_i(k+j))^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_i \Delta u_i(k+j-1)^2$$

Que considera 13 variáveis controladas ( $y_i$ ) num horizonte  $N_p$  e 3 manipuladas ( $u_i$ ) num horizonte  $N_u$ . A minimização de  $J$  se realiza considerando restrições nos valores do controle e do incremento do controle, e os pesos definidos para cada termo de  $J$ , ( $\delta_{ij}$ ) foram escolhidos para manter as variáveis operando em bandas. Assim, caso a variável esteja dentro da banda desejada o peso é zero, e se ela está fora da banda o peso é não nulo, fazendo que o controle leve a controlada para a banda desejada. Neste problema se consideraram como controladas as rotações dos 5 compressores da ECG, a potência total consumida e as 7 pressões interestágio. Como manipuladas se

usaram as referências de pressão para os compressores principal, de injeção e de exportação. Finalmente os modelos usados para realizar as previsões foram lineares, obtidos a partir da resposta ao degrau do sistema não linear completo da ECG próximo do ponto de operação desejado.

### O sistema de software

Para apresentar a implantação do sistema de controle avançado proposto nas plataformas, retoma-se a Figura 5. Mesmo se tratando de uma nova implementação, destaca-se que os dispositivos referentes às duas camadas mais baixas da pirâmide já se encontram instalados e devidamente operacionais na plataforma – caso contrário a mesma não estaria em operação.

Conforme destacado anteriormente, o sistema de controle avançado opera na terceira camada da pirâmide. Acontece que os controladores básicos, presentes na camada inferior, executam em equipamentos próprios, conectados diretamente à rede industrial. Por sua vez, o controle avançado executa em computadores de propósito geral, do tipo PC. Assim, surge a necessidade de se estabelecer um mecanismo de comunicação tal que permita

ao controle avançado se comunicar com os controladores básicos para poder ler dados (variáveis controladas e perturbações) e escrever dados (variáveis manipuladas). Utilizou-se uma solução baseada em servidor OPC (*Open Platform Communications*), o qual serve de ponte de comunicação entre o sistema de controle avançado e os dispositivos monitorados e controlados pelo mesmo. O uso dessa estrutura desacoplada, baseada em OPC, permite também que se trabalhe com plantas simuladas ao invés de plantas reais.

Para facilitar a implementação das chamadas “manobras de operação” na planta (real ou simulada), como por exemplo as ações do controle avançado, a Petrobras disponibiliza um software denominado MPA (Módulo de Procedimentos Automatizados). Além de permitir uma padronização no desenvolvimento, o MPA permite que o desenvolvedor se concentre na aplicação propriamente, sem se preocupar com os diversos detalhes de mais baixo nível, como as rotinas de acesso ao servidor OPC, que fazem parte do MPA.

O algoritmo de controle também foi implementado utilizando uma estrutura mais generalista, utilizando uma biblioteca desenvolvida no escopo do projeto, denominada GMPCLib (*Generic MPC library*). A mesma é capaz de atender um amplo leque de aplicações baseadas em MPC, além de poder se comunicar com ferramentas externas, como o MPA. A GMPCLib foi implementada na linguagem C++ e disponibilizada para uso na forma de uma DLL compilada para o MS-Windows.

Ao longo do projeto foram desenvolvidas outras ferramentas de apoio e estruturas que permitem um melhor reaproveitamento das especificações. A ferramenta BRConfig foi

criada para suportar a pré-configuração de aplicações que interagem com a GMPCLib, permitindo o ajuste de parâmetros e a definição das variáveis (*tags*) OPC junto à planta sendo automatizada. Já o chamado Editor de HMI foi desenvolvido para uso ao longo do processo de desenvolvimento de aplicações no MPA, permitindo a monitoração em tempo de execução das variáveis de interesse, armazenando seus valores e permitindo sua impressão na forma de gráficos ou janelas de texto. Por fim, destaca-se a estrutura M4PIA, a qual permite reaproveitar especificações de equipamentos e também permitir o intercâmbio de tais especificações entre diversas ferramentas com base em conceitos da Engenharia Baseada em Modelos.

### Resultados

Os resultados obtidos no projeto foram bastante satisfatórios, uma vez que o controle avançado mostrou capacidade para melhorar o desempenho da ECG nas situações críticas, por exemplo, quando há grandes variações da vazão de gás de entrada. Ainda, em situações de vazão de entrada pouco oscilatória, o CPM leva o sistema a operar em pontos de menor consumo de energia. Os testes realizados em simulação consideram todo o sistema de controle da forma como será implementado na plataforma e apenas o processo sendo simulado em um software específico, com um modelo completo da ECG.

A modo de exemplo, as Figuras 7, 8 e 9 mostram respectivamente a vazão de gás usada

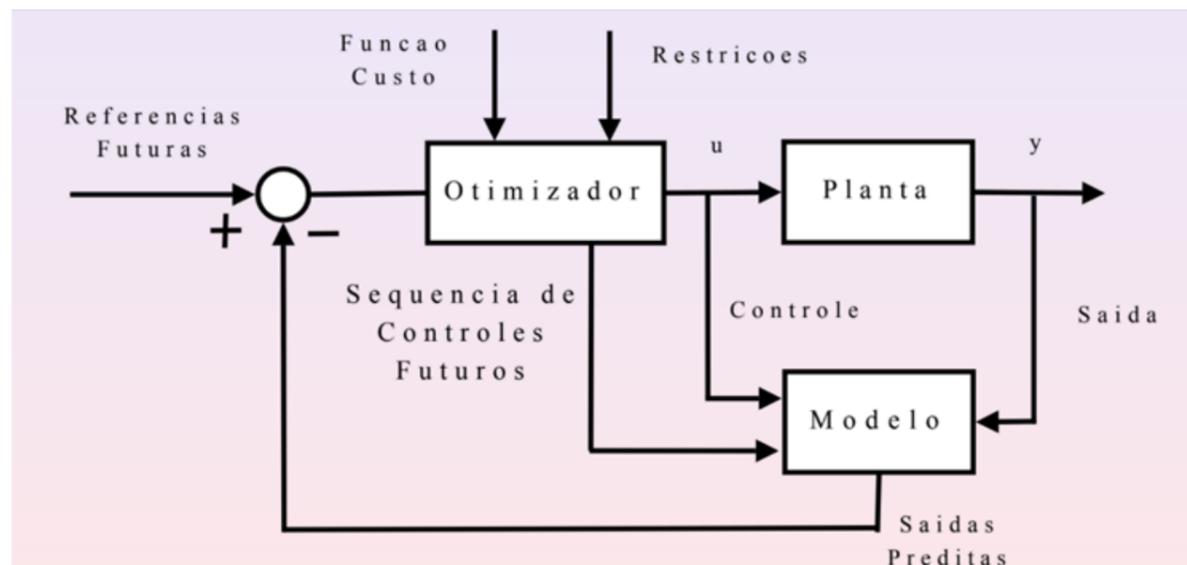


Figura 6: Esquema básico do CPM.

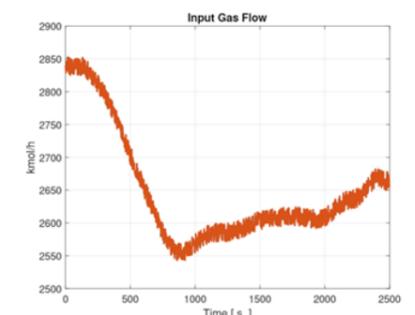


Figura 7: Vazão de gás de entrada usada como perturbação.

como perturbação, as variáveis manipuladas e duas das variáveis controladas.

Como pode ser observado, o CPM atua nas 3 manipuladas para levar as variáveis controladas para dentro da banda especificada (em linhas de pontos nas figuras). No caso do controle unicamente com os PIDs, o operador deveria fazer a mudança de referências manualmente, o que não é tarefa simples dado os acoplamentos entre os sistemas. Podemos observar como a rotação e pressão diferencial do compressor principal saem da banda sem o uso do controle avançado, o que prejudica o comportamento da unidade.

Por fim, apresenta-se na Figura 10 como o controle proposto melhora o desempenho da potência total consumida, mantendo-a na banda especificada mesmo com a presença da perturbação de vazão.

### Próximos passos

O projeto finalizou com testes simulados em *hardware-in-the-loop*, usando todo o sistema de

controle da forma como será implementado na plataforma e a planta numa estrutura simulada. Testes de *stress* do sistema de controle foram realizados assim como de robustez. Os próximos passos são a implantação em uma plataforma real, precisando realizar ajustes no modelo para adequar à plataforma a ser usada e também ajustes finos na sintonia do controle.

### Conclusões

Este artigo apresentou o desenvolvimento de uma solução de controle avançado para um sistema de compressão de gás. Na pesquisa se realizou a modelagem do sistema, se propôs o controlador e também uma estrutura de software capaz de se implementar os algoritmos propostos em ambiente real, semelhante aos utilizados nas plataformas da Petrobras. A comparação entre um sistema de controle com CPM e outro sem ele mostrou que o controlador avançado é mais adequado para manter o comportamento do sistema de compressão em uma região de operação estável.

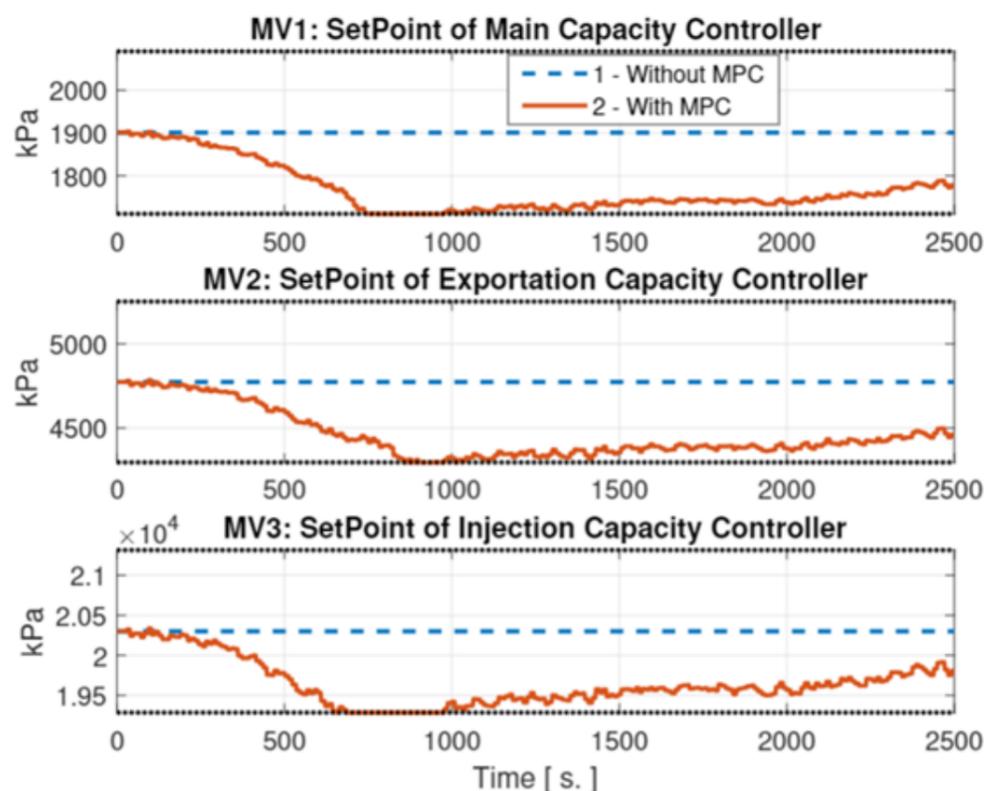


Figura 8: Variáveis manipuladas, sem controle avançado (—) e com controle avançado (-).

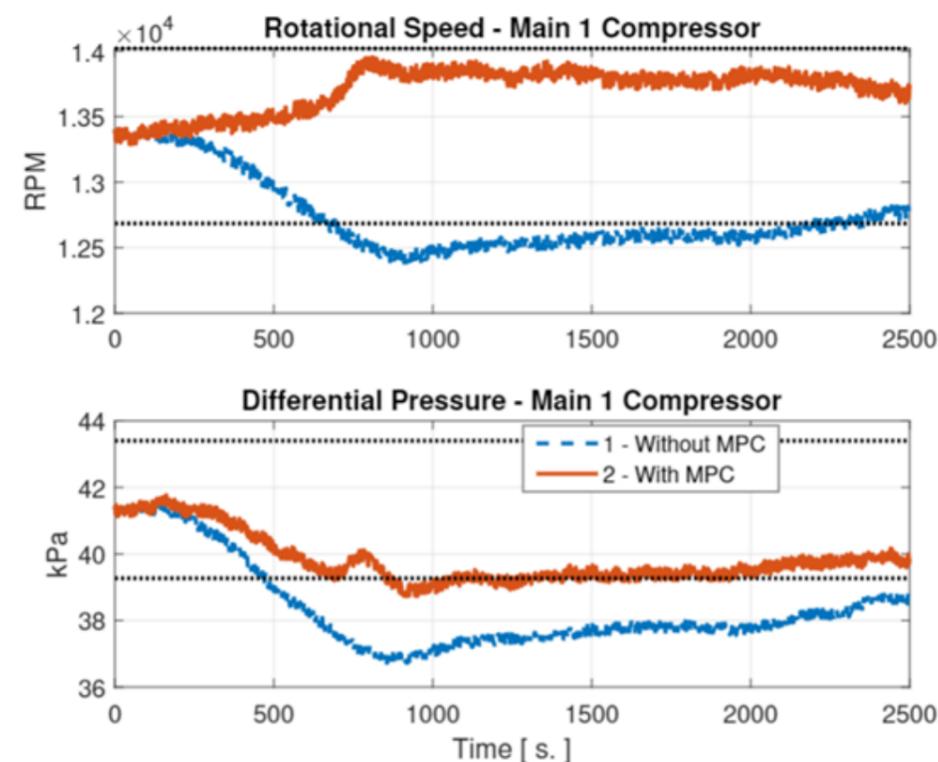


Figura 9: Variáveis controladas pressão e rotação do compressor principal, sem controle avançado (—) e com controle avançado (-).

Na indústria atual, um operador humano geralmente é responsável por supervisionar a operação do sistema e de tomar ações caso algum comportamento estranho for observado. No entanto, em processos multivariáveis como o da ECG, não é fácil de se executar manipulação manual, sendo necessário um conhecimento completo do sistema e dos efeitos de acoplamento entre as diferentes variáveis. Assim, o uso de um algoritmo de controle avan-

çado como o MPC aqui proposto pode auxiliar o operador a agir adequadamente sobre o desempenho geral do sistema, ou mesmo trabalhar de modo autônomo para manter o mesmo em regiões adequadas de operação.

#### Equipe UFSC:

Carolina M. Vettorazzo,  
Daniel M. Lima,  
João Bernardo A. Ribeiro,  
José Silvan B. Mota Júnior,  
Julio E. Normey-Rico,  
Leandro Buss Becker,  
Marcus Vinícius Silva Cruz,  
Rafael Sartori,  
Rodrigo da Silva Gesser,  
Thaise P. Damo.

#### Equipe Petrobras:

Leonardo D. Ribeiro,  
Marcelo L. de Lima,  
Mario C. M. M. Campos.

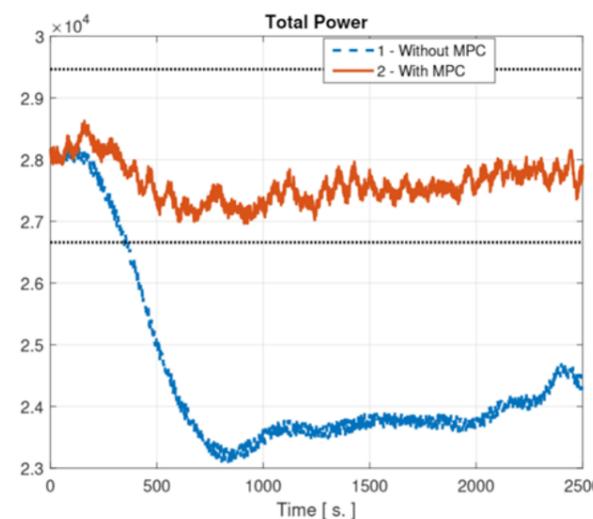


Figura 10: Potência total consumida, sem controle avançado (—) e com controle avançado (-).

# Instrumentação e modelagem para monitoramento de contaminação por petróleo e derivados

**Autor:** Prof. Rodolfo César Costa Flesch

Os vazamentos acidentais de petróleo e de seus derivados em unidades operacionais representam riscos ao meio ambiente e à saúde humana. Apesar de existirem alguns protocolos de remediação de áreas contaminadas, tipicamente o processo envolve técnicas que acabam descaracterizando o ambiente original, como a remoção de solo da área contaminada ou o bombeamento hidráulico dos contaminantes [1]. Além disso, mesmo depois da remoção do volume principal de contaminantes, tipicamente há uma quantidade residual de contaminantes que é muito difícil de ser removida por métodos tradicionais. Essa quantidade residual é formada pelos hidrocarbonetos em fase pura (também conhecidos como LNPAL, do inglês *light non-aqueous phase liquid*), que se infiltram no solo e muitas vezes atingem o lençol freático. Esses contaminantes são menos densos que a água e permanecem sobre o nível da água subterrânea, sendo transportado junto com ela conforme os movimentos do lençol. Isso causa uma pluma de contaminação que tipicamente tem baixo potencial de causar explosões, mas é bastante nociva ao meio ambiente.

Estudos de longa duração acompanhando a degradação dos hidrocarbonetos em solo demonstram que as taxas de biodegradação natural de hidrocarbonetos de petróleo são elevadas. Além disso, há a possibilidade de acelerar esse processo com o uso de microrganismos, em uma técnica conhecida como biorremediação do solo. Contudo, a demonstração da ocorrência de processos naturais de biodegradação ainda é onerosa, pois é baseada em monitoramentos de longa duração com a realização de coletas de amostras (muitas vezes em regiões remotas) e análises laboratoriais. Diversos estudos demonstram que a biodegradação dos hidrocarbonetos é um processo termodinâmico que fornece calor ao ambiente subsuperficial. O calor gerado por esse processo é equivalente ao que seria obtido na queima do hidrocarboneto, porém o processo

de biodegradação é bem mais lento. Apesar disso, há estudos que mostram que a biodegradação causa uma variação de temperatura no subsolo da região contaminada [2].

Um projeto de pesquisa em execução na UFSC fruto de uma parceria entre a Petrobras, o PPGEAS e o Núcleo Ressacada de Pesquisa em Meio Ambiente (REMA) busca desenvolver um sistema termodinâmico de monitoramento de fontes de contaminação. O projeto visa desenvolver tanto a instrumentação para possibilitar as medições de campo quanto um modelo matemático que permita estimar a taxa de perda de massa de hidrocarbonetos a partir das medições realizadas. Como objetivo final, busca-se propor um método de custo atrativo capaz de realizar o monitoramento remoto da taxa mínima de biodegradação passiva (ou devido a processos ativos de biorreme-



Figura 1: Sistema de monitoramento de fontes de contaminação instalado em área contaminada com gasolina e etanol.



Figura 2: Esquema geral de comunicação entre os softwares desenvolvidos no projeto.

dição) de fontes de contaminação, como uma estratégia para acompanhamento ou encerramento de casos de contaminação. O projeto conta com bolsistas de graduação e pós-graduação tanto vinculados diretamente ao convênio com a Petrobras quanto vinculados ao PRH 2.1.

O sistema de instrumentação contém uma série de transdutores de temperatura e umidade do solo para caracterização das alterações provocadas pelo processo de biodegradação. Essas medições são feitas diretamente no solo por meio de hastes instrumentadas. Além das características do solo, o sistema mede a radiação solar incidente, a precipitação acumulada, a intensidade do vento, a temperatura e a pressão do ambiente, o nível do lençol freático e a concentração de metano e gás carbônico na superfície. Todas as medições são feitas de forma automática por um sistema de aquisição de dados alimentado por bateria e placas solares e os dados são transmitidos por radiofrequência (em protocolo próprio) ou por meio de uma rede 4G de celular. Uma foto do sistema instalado em uma área experimental contaminada com gasolina e etanol é apresentada na Figura 1. Nessa foto não é possível ver os poços de monitoramento que efetivamente estão sendo utilizados para o estudo, porém eles possuem a mesma estrutura dos tubos brancos que saem do chão na foto.

Na montagem atual, os dados de campo

são armazenados no sistema de aquisição de dados e transmitidos para uma sala de controle localizada há cerca de 2 km do ponto de instalação em campo. Essa distância poderia ser bem maior em caso de necessidade. O computador localizado na sala de controle processa os dados medidos em campo com uso do modelo proposto no projeto para determinar a potência gerada pela biodegradação, o que é usado para estimar a taxa de biodegradação e, conseqüentemente, a taxa de remoção de contaminantes do solo. A informação pode ser acessada diretamente no software de processamento ou por uma interface web, acessível pela Internet para dispositivos autorizados. Um esquema geral da comunicação entre os diferentes aplicativos é apresentado na Figura 2.

O modelo matemático desenvolvido permite duas formas de processar os dados medidos: (1) por meio de comparação entre as temperaturas na área afetada e em uma região com características semelhantes, porém longe da contaminação; ou (2) a partir de uma única haste de medição vertical, inferindo as trocas de calor nas diferentes alturas de medição. Em ambos os casos, o modelo é resolvido numericamente para encontrar o valor da potência equivalente à fonte de contaminação que faz com que as temperaturas no solo sejam iguais às temperaturas medidas em campo. Para isso, é necessário considerar uma série de características do solo e fazer correções com os da-

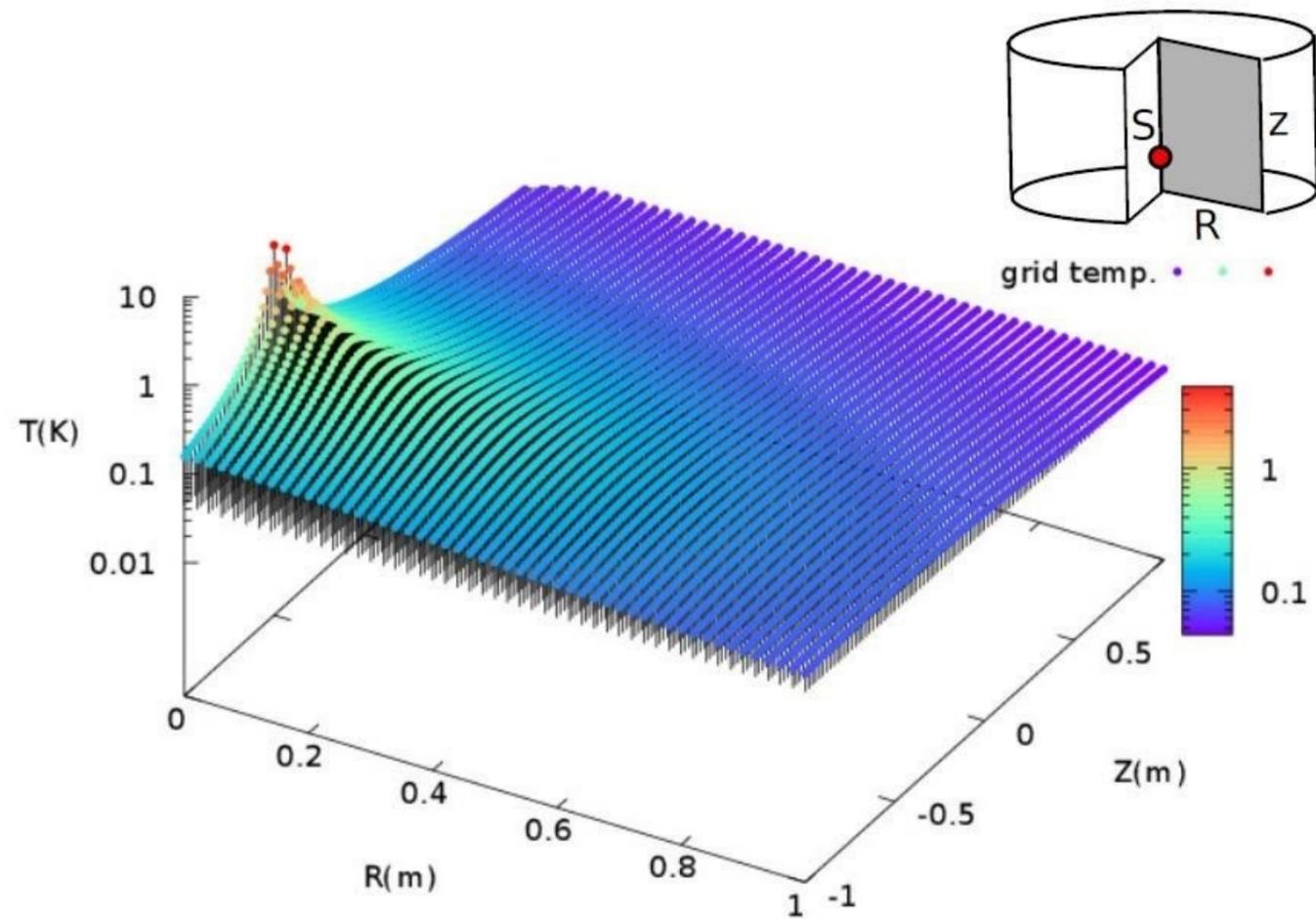


Figura 3: Perfil de temperatura reconstruído pelo software de processamento de dados empregando o modelo desenvolvido.

dos ambientais medidos pelo sistema de monitoramento instalado em campo. Uma representação esquemática de um perfil de temperaturas reconstruído pelo modelo é apresentada na Figura 3. Essa figura apresenta, em escala logarítmica, o perfil de temperatura em função do raio medido em torno de um eixo de simetria do modelo e da profundidade da medição.

As interfaces gráficas dos softwares de processamento e visualização dos dados ainda estão em desenvolvimento, porém um exemplo ilustrativo da visão atual da tela apresentada em um navegador web para o software de visualização dos dados é apresentado na Figura 4. Além das estimativas da taxa de biodegradação, é possível acompanhar os resultados de todas as medições de campo conforme elas ocorrem. Além disso, o sistema emite alertas em situações predefinidas, como descarga da bateria ou perda da leitura de algum dos transdutores.

Atualmente, o sistema desenvolvido está em

uma área experimental com contaminação real, porém passada a fase de avaliação sob condições mais controladas, ele será instalado em uma área operacional da Petrobras em que tenha ocorrido algum derramamento. Os resultados do sistema proposto serão comparados com os obtidos em laboratório para amostras de solo contaminado, como forma de validar o comportamento em ambiente real de aplicação industrial.

Uma vez validada a ferramenta, ela deverá ser adotada em áreas remotas para poder acompanhar os níveis de contaminação ao longo do tempo e fornecer parâmetros para a tomada de decisão sobre o gerenciamento dessas áreas. Como impacto direto do projeto, espera-se a redução dos impactos ambientais por conta de medidas de remediação mais agressivas ao meio ambiente em situações nas quais a depleção natural da zona da fonte ou a biorremediação poderiam ser adotadas. Além disso, espera-se obter redução dos custos com atividades de

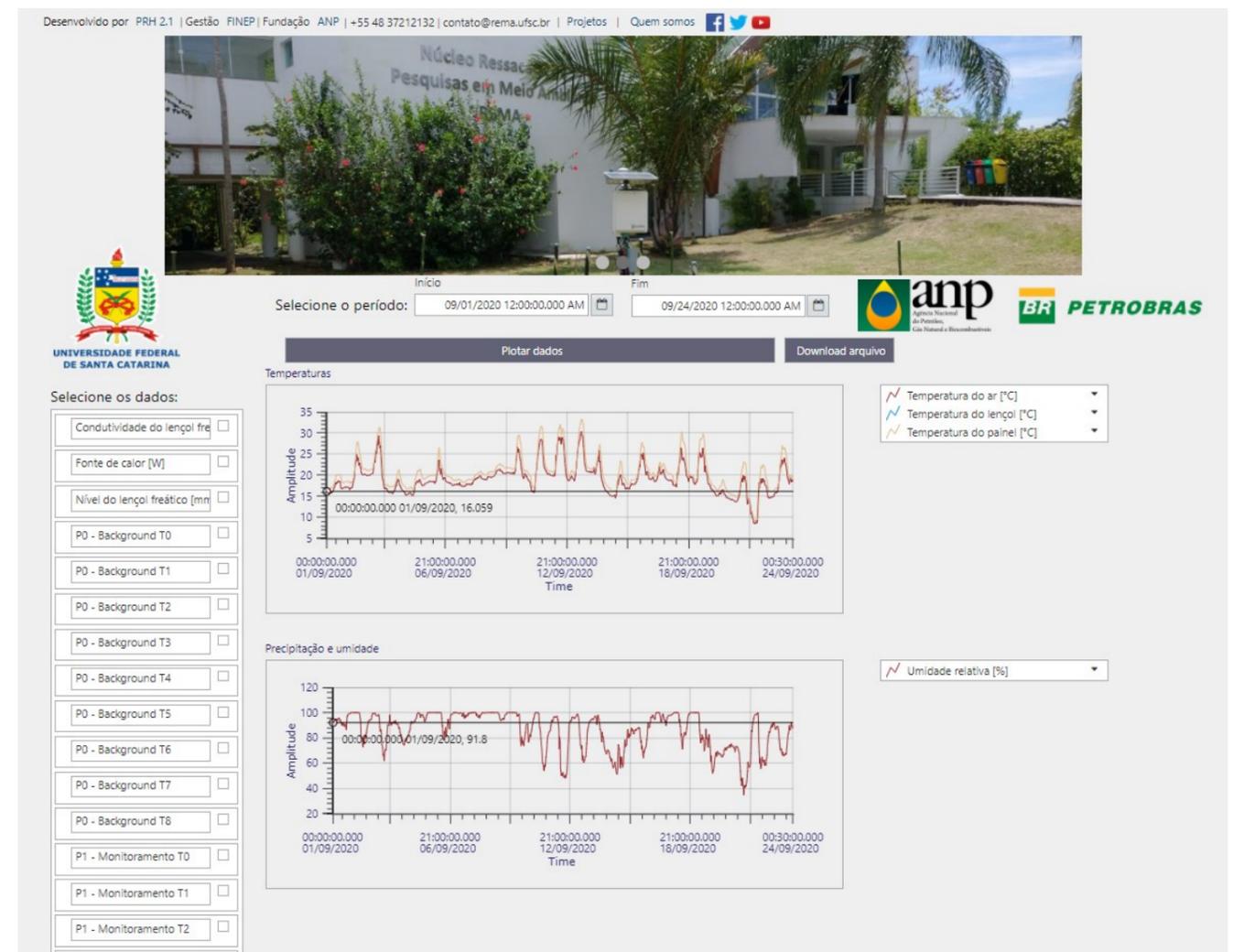


Figura 4: Exemplo de medição apresentada na interface web de visualização dos resultados dos ensaios.

monitoramento e remediação de áreas contaminadas da indústria do petróleo e biocombustíveis.

#### Referências

- [1] M. Daghio; F. Aulenta; E. Vaiopoulou; J. A. A. Franzetti; A. Sherry; A. Suarez-Suarez; I. Head; G. Bestetti; K. Rabaey. Electrobioremediation of oil spills. **Water Research**, v. 114, n.

1, p. 351–370, 2017.

- [2] P. R. Kulkarni; D. C. King; T. E. McHugh; D. T. Adamson; C. J. Newell. Impact of temperature on groundwater source attenuation rates at hydrocarbon sites. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 37, n. 3, p. 82–93, 2017.

## Recuperação térmica de petróleo a partir da energia solar

**Autores:** Prof. Gustavo Artur de Andrade e Leticia Capistrano Favero (mestranda do PPGEAS)

O crescente aumento da demanda global de energia representa um grande desafio para as empresas de energia, principalmente para as empresas de óleo e gás devido à diminuição das reservas de petróleo no planeta e o aumento da dependência de óleo pesado, o qual requer maior energia no processo de produção.

Atualmente, métodos de recuperação são utilizados para aumentar a vida útil do campo petrolífero e atender as demandas de energia por meio das fontes de hidrocarbonetos.

Os métodos de recuperação dependem das características do reservatório e de como a acumulação de hidrocarbonetos é produzida.

Quando a produção não é suficiente por meio de métodos naturais, ou seja, a energia natural do reservatório não é capaz de elevar o fluido até a superfície, deve-se utilizar métodos de recuperação secundários ou terciários. Tais métodos se remetem a uma repressurização da jazida através da introdução de uma energia artificial por meio de poços de injeção suplementando a energia perdida e melhorando a eficiência do deslocamento do petróleo.

O método terciário é utilizado quando os anteriores não são suficientes, pois também busca-se alterar as propriedades dos fluidos e sua interação com a rocha para reduzir a resistência ao fluxo do petróleo no meio poroso. Este método é capaz de produzir uma grande quantidade de óleo, com o qual de outra maneira, esse fluido remanescente seria abandonado na formação, chegando assim ao fim da vida econômica do reservatório. O método terciário ainda pode ser subdividido em térmico e não térmico.

A recuperação térmica foi um dos primeiros métodos a ser desenvolvido para viabilizar a produção de petróleo extremamente viscoso em campos considerados não comerciais. Atualmente, este método possui um elevado número de aplicações e é altamente recomendável devido ao seu estímulo e eficácia.

No Brasil, esta técnica apresenta um histórico de sucesso, por exemplo, a Petrobras utiliza de forma abrangente em campos localizados na região Nordeste e do Espírito Santo. Neste processo de recuperação, a energia é injetada em forma de calor, ocasionando um aumento da temperatura do óleo, e como consequência, a viscosidade do fluido diminui melhorando sua mobilidade. Tradicionalmente, vapor superaquecido derivado da queima de gás natural é utilizado na recuperação térmica, mas sua aplicabilidade vem se tornando limitada devido às regulamentações de proteção ambiental.

Nos últimos anos, a tecnologia de concentração solar térmica tem sido considerada uma alternativa promissora para geração de vapor em operações de recuperação devido aos desenvolvimentos tecnológicos que permitem maior eficiência e menores custos associa-

dos à captura da energia solar. Em plantas de concentração solar térmica, espelhos são usados para concentrar a luz do sol em um receptor no qual um fluido de transferência térmica (água, óleo sintético ou sal fundido) produz vapor de alta temperatura, pressão e qualidade. Diferentes tecnologias de concentração solar térmica usadas para a geração de vapor são apresentadas na Figura 1. Nestes sistemas, também é possível utilizar armazenamento térmico para que a planta opere com horários escalonados ao invés de somente em modo de despacho da energia solar atual. Um diagrama esquemático de um campo de petróleo operando com um sistema de recuperação baseado em energia solar térmica é apresentado na Figura 2.

O Projeto Solar 21Z comissionado pela GlassPoint Solar em parceria com a Berry Petroleum e desenvolvido na Califórnia, EUA, desenvolveu a primeira planta piloto operando com recuperação térmica solar. Posto em operação em 2010, este sistema é capaz de gerar 1 milhão de Btus de calor solar por hora utilizando um campo de coletores cilindro parabólicos com área total de aproximadamente 1 acre. Outra planta piloto, comissionada pela GlassPoint Solar e a empresa Petroleum Development Oman (PDO), está operando em Amal, Oman, desde 2012. Este sistema também utiliza a tecnologia de coletores cilindro parabólicos e é 27 vezes maior que a instalação do Projeto Solar 21Z. Sua capacidade geração média diária é de 50 toneladas de vapor, que equivale a cerca de 20% do vapor necessário nas operações de recuperação dos campos da PDO. Recentemente, o projeto Belridge Solar, articulado entre a GlassPoint Solar e Aera Energy, foi anunciado e possui o objetivo de produzir 12 milhões de barris de vapor por ano através de um gerador de vapor solar de 850 MW. Estima-se que com esta potência será possível reduzir 376.000 toneladas de carbono produzido pelo campo de petróleo por ano. A planta está sendo construída na Califórnia e será a maior instalação de recuperação térmica baseada em energia solar quando finalizado.

A recuperação térmica baseada em energia solar apresenta claras vantagens sobre

as configurações tradicionais devido à sustentabilidade com o meio ambiente e a baixa geração de poluentes, características importantes devido ao surgimento de novas leis e protocolos para impulsionar o uso das fontes de energia renovável. Isso leva à questão: por que o método de recuperação térmica solar ainda não foi implementado em grande escala? Além disso, se a energia solar é tão vantajosa, por que nem todas as empresas de óleo e gás estão utilizando-a?

As respostas se resumem aos aspectos práticos da energia solar em geral e da realidade das indústrias de óleo e gás. Do ponto de vista prático, a desvantagem da energia solar é sua incapacidade de ser utilizada fora de regiões com alto fluxo solar. Entretanto, o que desencoraja as empresas de petróleo de adotarem essa tecnologia são os investimentos altos de capital inicial envolvidos. Em um setor turbulento como o petróleo, as empresas não estão dispostas a investirem grandes quantias de capital em projetos que podem ter apenas uma vantagem econômica nominal em um horizonte de curto prazo. A real vantagem econômica da recuperação térmica baseada em energia solar está no horizonte financeiro de longo prazo. No horizonte de curto prazo, as vantagens econômicas da energia solar ainda são obscuras.

Vantagens ambientais não são suficientes para que as empresas produtoras de óleo e gás utilizem a recuperação térmica baseada em energia solar. A viabilidade econômica sempre será o principal determinante na produção de petróleo. Assim, diversas pesquisas têm sido realizadas para aumentar a viabilidade econômica desta tecnologia. No Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), uma pesquisa foi iniciada no contexto da dissertação de mestrado da aluna Letícia Capistrano Favero e do trabalho de conclusão de curso do aluno Vinícius Garibaldi Rigon do curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação da UFSC, ambos bolsistas do Programa de Recursos Humanos ( PRH 2.1) da Agência Nacional de Petróleo- Formação de Engenheiros em Automação, Controle e

Instrumentação para Petróleo, Gás e Biocombustíveis - com o objetivo de desenvolver metodologias de controle avançado e otimização para aumentar a eficiência desta tecnologia tornando-a mais competitiva em relação aos



Coletores planos Fresnel



Torre solar



Coletores cilindro parabólicos

Figura 1: Tecnologias de concentração solar térmica usadas para geração de vapor.

métodos de recuperação tradicionais. Trata-se de um trabalho de pesquisa inovador, já que os estudos disponíveis na literatura focam principalmente na análise das vantagens ambientais da recuperação térmica baseada em energia solar e não em metodologias de controle e automação para melhorar sua produção.

No presente momento, a base da pesquisa está sendo realizada e consiste no estudo e desenvolvimento de simuladores numéricos de plantas solares térmicas de coletores cilindro parabólicos e seu acoplamento geomecânico com o reservatório. Foi verificado que a topologia de concentração térmica solar com geração indireta de vapor operando com um sistema de armazenamento térmico em paralelo é a opção mais viável para esta aplicação, pois permite armazenar energia para gerar vapor em horários escalonados ao invés de somente em modo de despacho da energia solar atual. Além disso, o excedente de vapor também pode ser utilizado para a co-geração de eletricidade oferecendo uma grande oportunidade para reduzir ainda mais os custos de produção.

As estratégias de controle e otimização serão desenvolvidas com ênfase em metodologias consideradas promissoras na indústria, como por exemplo, controle preditivo baseado em modelo e controle ótimo. Para sua validação, será considerado um conjunto de cenários numéricos bem definidos com dados econômicos e meteorológicos reais, e potencial calculado em termos da fração solar, relação do pico de vapor e terra ocupada. Uma possibilidade é utilizar a configuração dos campos brasileiros do Nordeste e Espírito

Santo, já que estão localizados em uma região de irradiância solar abundante e apresentam-se em fase de declínio produtivo. A previsão de término desta pesquisa é para o ano de 2022.

### Referências

Brockway, P. E., Owen, A., Brand-Correa, L. I. e Hardt, L. Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. *Nature Energy*, vol. 4, pp. 612-621, 2019.

GlassPoint Solar. Aera Energy and GlassPoint to build California's largest solar energy project at Belridge Oilfield. Disponível em: <https://mailchi.mp/glasspoint/belridge-solar-announcement>

Gregory, M., e E. Young. Solar enhanced oil recovery - An in-country value assessment for Oman. Technical Report, Erns & Young LLP, 2014.

Halabi, M. A., Al-Qattan, A. e Al-Otaibi, A. Application of solar energy in the oil industry: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 296-314, 2015.

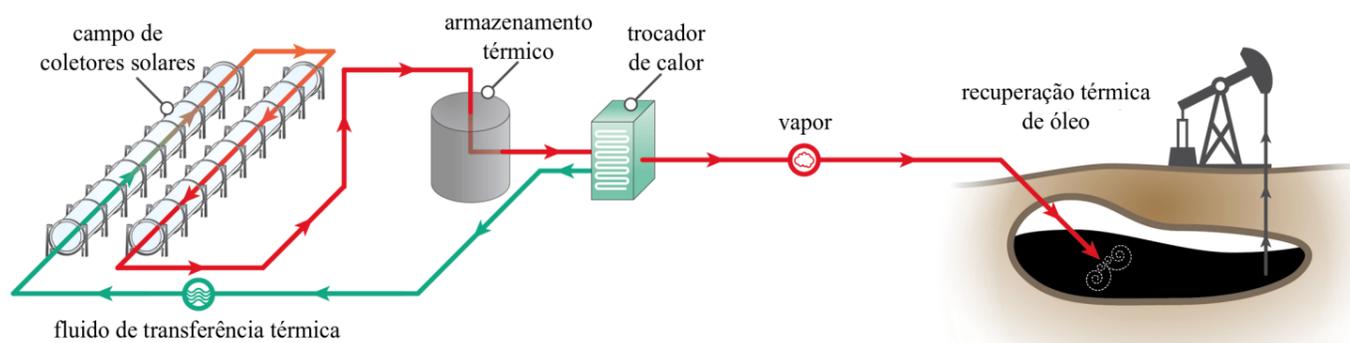


Figura 2: Diagrama esquemático de uma planta operando com recuperação térmica baseada em energia solar.

## MARLIM TUNING: Sintonia de simuladores multifásicos por meio de otimização sem derivada

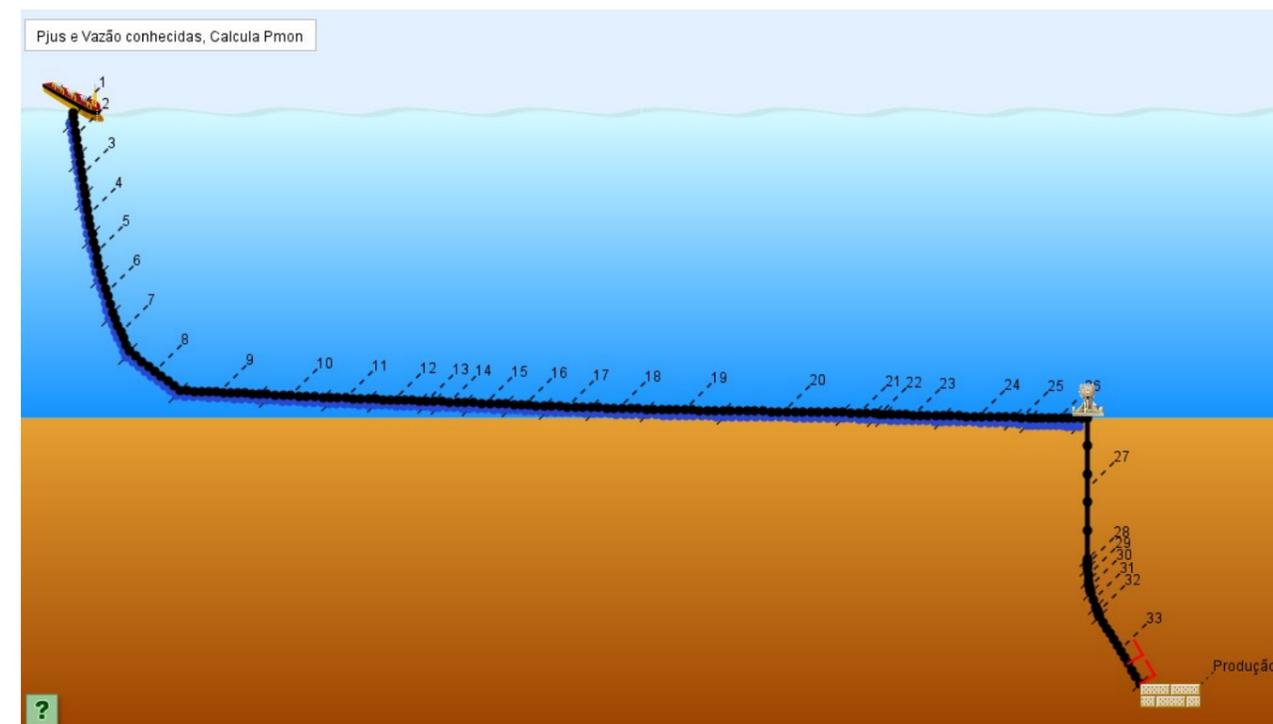
**Autores:** Laio Oriel Seman, Caio Merlini Giuliani, Eduardo Camponogara, Luis Kin Miyatake (CENPES), Bruno Ferreira Vieira (CENPES)

A análise do escoamento multifásico de poços produtores é realizada periodicamente em separadores de teste, produzindo dados sobre as propriedades do fluido e do reservatório, tais como a razão gás-óleo, a fração de água, e medições de temperatura e pressão dos sensores. Esses dados permitem o ajuste de simuladores de fluxo multifásico para refletir as condições predominantes do reservatório e dos processos de produção. Além de atender às demandas da agência reguladora, um modelo bem ajustado permite aos engenheiros planejar a produção e derivar modelos representativos para otimização da produção. Neste contexto, este trabalho, realizado em parceria com o Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES), propõe o uso de métodos de otimização sem derivadas para ajuste de um simulador de escoamento multifásico interno amplamente utilizado pela Petrobras, conhecido como MARLIM (Multiphase Flow and Artificial Lift Modelling).

O desenvolvimento da pesquisa aconte-

ceu no âmbito do projeto “Estratégias para Otimização Estática e Dinâmica de Sistemas Marítimos Complexos de Produção de Óleo e Gás”, coordenado pelo prof. Eduardo Camponogara do DAS. Tal projeto visa desenvolver soluções tecnológicas para lidar com a complexidade crescente dos campos de produção de petróleo marítimos.

O simulador MARLIM é normalmente empregado em análises de sensibilidade e garantia de escoamento de poços surgentes ou equipados com *gas lift*. Uma vez que a configuração do sistema de produção é definida, o simulador calcula uma das seguintes três variáveis de interesse dadas as outras duas: fluxo de equilíbrio (equilibrium flow), pressão a jusante ou pressão a montante da válvula de produção. Os cálculos de perfis são realizados para estimar a pressão de escoamento e a temperatura ao longo dos dutos. As condições de operação de cada válvula de subsuperfície também são calculadas, incluindo os fluxos de gás. Para tanto, o simulador divide o poço de



interesse em diversos segmentos (conforme figura abaixo), que podem ser ajustados individualmente para melhor refletir a real operação do mesmo.

Os dados dos poços são tipicamente obtidos de forma isolada quando ele é roteado para um separador de teste, um procedimento que é executado periodicamente e exigido pela agência reguladora para fins de auditoria. Desta forma, os parâmetros do modelo de simulação podem ser ajustados para melhor identificar os parâmetros e reproduzir os comportamentos observados durante o teste de poço. Este procedimento de ajuste pode ser dividido em duas etapas. A primeira ajusta a curva TPR

(Tubing Performance Relationship), enquanto a segunda etapa ajusta a curva de IPR (Inflow Performance Relationship). A curva TPR é uma medida de desempenho do poço em relação a estudos de engenharia de poço, enquanto a IPR é a capacidade do reservatório de fornecer fluido dada uma certa pressão de fundo de poço.

De forma a poder se integrar diretamente com o simulador MARLIM, a técnica escolhida é conhecida como otimização sem derivadas. Os métodos de otimização sem derivada permitem a otimização quando a função objetivo não está explicitamente disponível, seus gradientes não são confiáveis, ou mesmo

são impraticáveis de serem obtidos, como é típico de modelos de simulação. Assim, o simulador MARLIM é usado como uma caixa-preta (blackbox) pelo otimizador, que atua variando as entradas para obter as saídas que melhor se adequem à função custo. A este esquema, ilustrado na figura abaixo, deu-se o nome de MARLIM Tuning. O otimizador sem derivadas (DFO, na sigla em inglês) altera os modelos de simulação a fim de conseguir reduzir o erro entre o resultado da simulação e as medições registradas em campo. Este processo é repetido até alcançar a convergência, quando espera-se que o modelo ajustado do poço reflita com maior precisão as medições realizadas no teste de separação.

Para avaliar a qualidade da metodologia, foram realizados testes de ajuste dos parâmetros do modelo de simulação de poços reais da Petrobras. A partir dos testes, foi possível aferir que a metodologia proposta é eficaz, mais especificamente, o ajuste automatizado rendeu relações de parâmetro de tubulação que se encaixam bem com medições de campo.

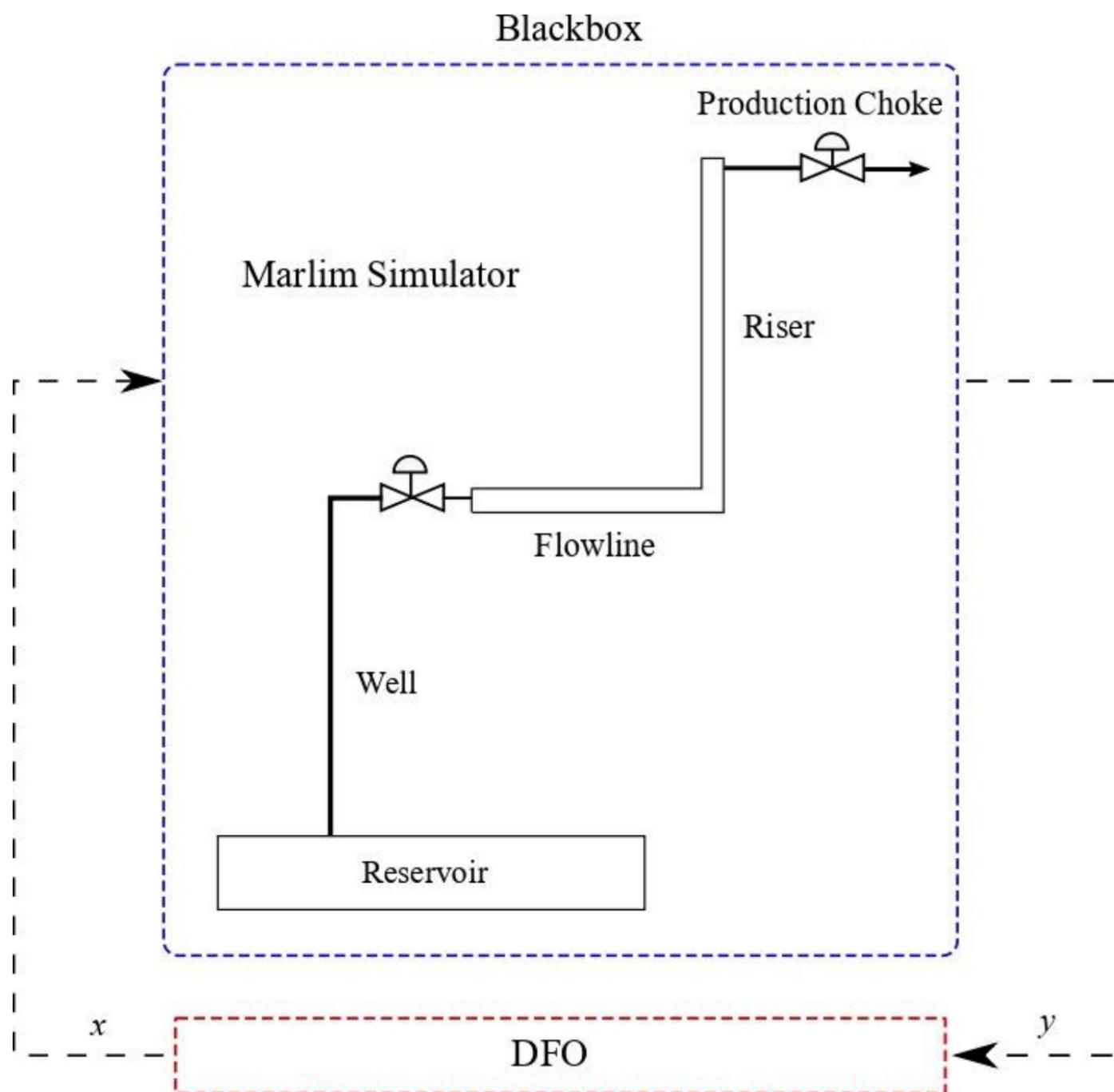
Ao todo, três métodos de ajuste foram considerados, desde o ajuste individual de TPR e IPR até um método de ajuste integrado, os resultados do teste mostraram que o ajuste individual dos parâmetros foi o método mais benéfico em termos de eficiência computacio-

nal. Embora técnicas de otimização sem derivadas não garantam a convergência para um ótimo global, elas permitem o uso de simuladores no controle e otimização de processos complexos. Essa flexibilidade permite uma modelagem mais realista das propriedades do sistema.

Atualmente, o sistema desenvolvido já se encontra disponível no sistema interno da Petrobras para ser utilizado pelos engenheiros no dia-a-dia, mostrando mais uma vez que a parceria entre a indústria e a academia é capaz de render frutos práticos. Além de fornecer medição virtual, um modelo bem ajustado pode ser usado para planejamento e otimização da produção, análise de risco, desenvolvimento e teste de algoritmos de controle, entre outros. Como a escala de produção desses sistemas geralmente é grande, mesmo pequenas variações dos modelos reais podem causar um impacto considerável na produção. Assim, reitera-se a importância do desenvolvimento de ferramentas para ajustes dos parâmetros de simulação em tempo hábil para as condições prevalecentes em resposta às medições mais recentes.

Links relacionados:

[Artigo no Journal of Petroleum Science and Engineering](#)



**Projeto de P&D: Validação de sistemas de controle e automação na Indústria do Petróleo e Gás utilizando métodos de teste, verificação e síntese de programas**

**Coordenador:** Prof. Max Hering de Queiroz

Desde as importantes descobertas de campos de petróleo na camada pré-sal, anunciadas em 2006 pela Petrobras, a produção offshore de petróleo e gás natural do Brasil vem crescendo vertiginosamente. No entanto, os grandes benefícios econômicos da produção de petróleo no pré-sal são acompanhados pelos custos ambientais e sociais decorrentes do aumento dos riscos de acidentes graves na costa brasileira. Por esse motivo, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) tem aprimorado o regime regulatório e as companhias petrolíferas têm investido em desenvol-

vimento tecnológico, a fim de melhorar a segurança dos sistemas críticos de instalações marítimas.

A segurança operacional das instalações de petróleo e gás conta com a existência de várias camadas independentes de proteção responsáveis pela prevenção de acidentes e, no pior dos casos, pela mitigação de danos. Neste contexto, o sistema instrumentado de segurança (SIS) é a última barreira de prevenção de acidentes. O SIS é um sistema automático composto pela combinação de sensores, controlador lógico e atuadores projetados especifica-

mente para identificar situações de risco e conduzir o processo de volta a um estado seguro de acordo com a estratégia de controle de segurança. O SIS é, portanto, um sistema crítico, uma vez que um erro de projeto pode ter consequências catastróficas para o patrimônio, para o ambiente e para as pessoas. Além disso, como as camadas inferiores de prevenção resolvem a maior parte dos casos de segurança, esses erros podem permanecer ocultos por muito tempo até que o SIS seja exigido para agir em uma situação crítica.

As falhas de Sistemas Instrumentados de Segurança podem ser classificadas como Falhas Seguras (Safe Failure), quando um efeito é ativado na ausência de qualquer das causas especificadas pela MCE, e Falhas Perigosas (Dangerous Failure), quando uma causa está ativa e o respectivo efeito de segurança não é ativado. As Falhas Perigosas em SIS estão diretamente associadas à ocorrência de catástrofes, porém as falhas seguras podem ser igualmente danosas no longo prazo uma vez que diminuem a confiabilidade dos operadores no SIS e podem levar à ocorrência de Falhas Seguras após a desativação de funcionalidades do SIS em prol da produtividade da unidade.

A norma IEC 61511 fornece boas práticas de engenharia para o ciclo de vida do SIS. Essa norma inclui procedimentos para definir funções instrumentadas de segurança (SIF) a partir da análise de risco do processo. Para cada SIF, de acordo com a frequência e gravidade associadas ao risco correspondente, especifica-se um nível de integridade de segurança (SIL) que serve como uma métrica de desempenho para os elementos do SIS. Uma vez que certos controladores lógicos programáveis (CLP) podem ser certificados como adequados para uso em cada classificação SIL, eles têm sido amplamente adotados para comandar a lógica de SIS. A implementação de programas de segurança para CLP deve seguir as normas IEC 61131-3 e IEC 61499 de acordo com metodologias de desenvolvimento rigorosas. No entanto, cada programa deve ser certificado individualmente para cumprir os requisitos específicos de um aplicativo SIS. Além dos

métodos usuais de teste de software, as normas de segurança recomendam o uso de métodos formais, baseados em modelos matemáticos, para a síntese e verificação de programas de CLP.

O desenvolvimento de programas de CLP para sistemas de automação na indústria de petróleo e gás natural segue um processo metódico em que documentos padronizados são criados e comunicados sistematicamente entre múltiplas equipes de engenharia. A metodologia é composta por uma sequência de passos documentados a partir de especificações básicas do processo que termina com a implantação de um programa de CLP testado. A partir do diagrama de processo e instrumentação (P&ID), juntamente com o conhecimento de especialistas e normas para SIS, os engenheiros definem o Memorial Descritivo, com as especificações funcionais, e a Matriz de Causa e Efeito (MCE), que estabelece as especificações da lógica de segurança relacionando as informações provenientes de sensores (causas) com as devidas ações de atuadores (efeitos). Além de servir de referência para a programação do CLP, a MCE é um documento fundamental para o teste de aceitação de fábrica (TAF), um processo que inclui a verificação da conformidade entre o comportamento do CLP programado e as especificações de segurança da MCE. Para sistemas com a complexidade das unidades de produção offshore, que tipicamente envolvem uma centena de MCE de 50 linhas por 50 colunas, a realização manual do teste de conformidade é um processo demorado e fatigante, que consegue abranger apenas uma pequena parcela do espaço de estados do CLP. A ferramenta de teste automático visa auxiliar o engenheiro a reduzir o tempo e, principalmente, a aumentar a cobertura do teste.

Dentre os vários métodos para validação de sistemas de CLP, o teste de conformidade, ou teste funcional, é uma abordagem do tipo caixa-preta, que permite verificar se o sistema está em conformidade com as especificações sem necessidade de conhecimento do seu programa interno. Basicamente, são aplicados

casos de teste às entradas do sistema e os resultados observados são comparados com o comportamento esperado de acordo com as especificações. Como a complexidade combinatória inviabiliza a geração de um conjunto exaustivo de casos de teste, o método de teste não pode produzir um veredito absoluto e positivo de conformidade. Assim, em sistemas críticos, o teste de conformidade deve ser tomado como uma técnica complementar, com o objetivo de diminuir o número de falhas não diagnosticadas. Conseqüentemente, a automação dos procedimentos de teste é uma estratégia importante para aumentar a cobertura dos testes de SIS, além de reduzir os custos, o tempo e os erros humanos dos testes manuais.

O método de teste automático de CLP desenvolvido pelo grupo de pesquisa do DAS-UFSC tem o foco nas relações de causa e efeito especificadas na MCE de acordo com a metodologia empregada no setor de petróleo e gás. Apesar de ter uma sintaxe mais simples do que os diagramas lógicos, a MCE especifica

um grande número de relações lógicas de segurança entre entradas (causas) e saídas (efeitos) do CLP, incluindo votações e temporizações. No método proposto, uma seqüência de casos de teste e um conjunto de oráculos na forma de Redes de Petri são automaticamente derivados das MCE (Figura 1). Em seguida, os casos de teste são usados para comandar as entradas do CLP e os oráculos são executados de acordo com as saídas resultantes para gerar um veredito. A pesquisa desenvolvida ao longo deste projeto aprimora tanto a técnica para geração de casos de teste, quanto dos modelos de oráculos com foco nas especificidades dos sistemas instrumentados de segurança para plataformas de petróleo offshore. Tais métodos de teste automático de CLP alcançaram maturidade tecnológica suficiente para desenvolvimento de um protótipo aplicável em casos reais ao longo do projeto. Já as pesquisas sobre verificação formal e síntese de controle supervisorio assumem um caráter mais exploratório em função dos desafios ci-

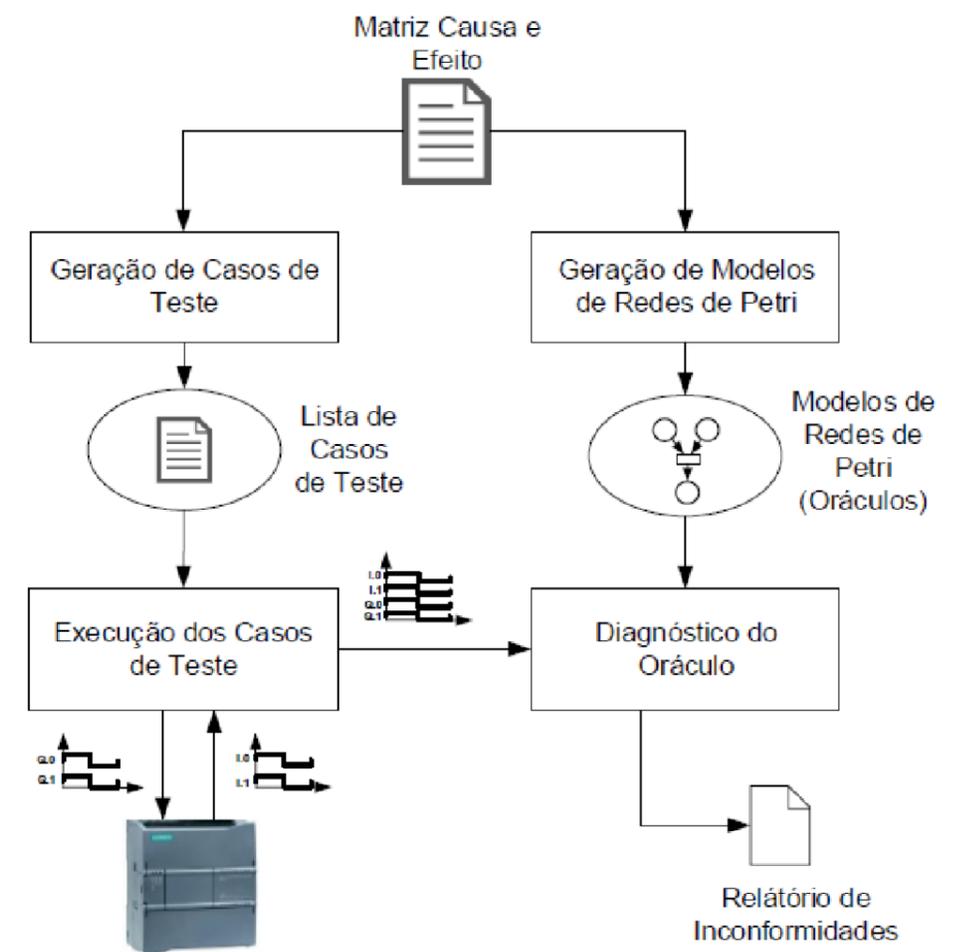


Figura 1: Método de teste.

entíficos e computacionais que dificultam a aplicação direta desses métodos aos sistemas com a complexidade típica da indústria de petróleo e gás.

O desenvolvimento do projeto foi realizado em três frentes de pesquisa: desenvolvimento de uma metodologia de teste automático de especificações de segurança em programas de controladores lógico-programáveis (CLP); aplicação de métodos de verificação formal em sistemas instrumentados de segurança; exploração de métodos formais de síntese de controle a eventos discretos para a indústria de petróleo e gás. Essas atividades, que serão explicadas resumidamente na sequência, seguiram rigorosamente os métodos científicos da área e tiveram seus resultados publicados em artigos científicos, relatórios técnicos, monografias e dissertações de mestrado.

A metodologia para teste de conformidade entre a MCE e o CLP de Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS) foi desenvolvida no contexto de uma dissertação de mestrado a partir de resultados anteriores do grupo de pesquisa, aprimorando-se os modelos de observadores abranger todas as classes de especificações previstas no padrão de segurança de processos no setor de petróleo e gás, e incorporando estratégias da literatura para ampliar a cobertura dos testes, como a inclusão do método CEG-BOR para geração automática de casos de teste e uso de Redes de Petri para geração automática de oráculos. Os estudos de casos simulados a partir dos dados da P51 indicaram que a metodologia é aplicável em sistemas reais da indústria de petróleo e gás natural e pode melhorar o diagnóstico de inconformidades entre o CLP e a MCE.

O desenvolvimento de metodologia para verificação formal de programas de CLP explorou diversas abordagens no contexto de duas dissertações de mestrado no PGEAS-UFSC e da cooperação internacional dos professores do DAS-UFSC com os pesquisadores do LAAS/CNRS, na França. No decorrer de uma orientação de mestrado, definiu-se um padrão para representar as propriedades de MCE em lógica temporal LTL e montou-se

uma cadeia de verificação formal de programas LD baseada em transformação de modelos para a linguagem intermediária FIACRE e na ferramenta de *model-checking* TINA/SELT. Foi desenvolvida uma ferramenta para visualização de contraexemplos e foram realizados alguns estudos de casos com subsistemas da P-51. Para pequenos problemas inspirados em casos reais de plataformas offshore, o método permitiu verificar exaustivamente a conformidade entre MCE e o programa LD, apresentando contraexemplos para o diagnóstico de falhas. Porém, o crescimento exponencial do tamanho dos modelos de verificação revelou-se um grande obstáculo à sua aplicação aos casos complexos da indústria de petróleo e gás. Assim, em diversas missões de cooperação técnica com o LAAS-CNRS, algumas das estratégias para lidar com a complexidade dos modelos de verificação na indústria aeroespacial francesa foram adaptadas ao problema em questão. Foram realizados vários experimentos com MCE e programas de CLP, cujos resultados indicam que o uso de estratégias de simplificação baseadas em cone de influência e métodos simbólicos pode viabilizar a aplicação de model-checking aos casos reais. Em outro trabalho de mestrado explorou-se ainda a validação de software de CLPs segundo a abordagem conhecida na literatura como “Learning-Based Testing”, que combina o uso de model-checking com aprendizagem de modelos de sistemas a eventos discretos, de modo a otimizar a geração de casos de testes de MCE para sistemas complexos nos casos em que um modelo matemático do sistema sob teste não está disponível.

Em outra orientação de mestrado, foram desenvolvidas estratégias de síntese e implementação de controle supervisorio para segurança operacional em um processo industrial de controle de nível contendo malha de válvulas e fazendo uma implementação real no controle de processo de uma planta piloto do DAS-UFSC com tecnologia Foundation Fieldbus. O controle supervisorio implementado demonstrou a viabilidade do método para aplicações em processos industriais, com a vantagem de que supervisor a eventos discretos é imple-

mentado em paralelo com o controlador contínuo, mas só atua em situações estritamente necessárias para evitar comportamentos inseguros do processo.

Para o desenvolvimento de um protótipo, inicialmente foram desenvolvidos o conceito e uma primeira versão de editor de Matriz de Causa e Efeito na linguagem Python com uma interface gráfica baseada nas especificações da ET-3000.00-1200-800-PGT-006, que estabelece o padrão de MCE para plataformas offshore da Petrobras (Figura 2). Este protótipo permite imprimir o documento no formato PDF e salvar num formato XML que pode ser importado pela ferramenta de teste automático de CLP.

Na sequência, foi desenvolvido um piloto de ferramenta de teste de conformidade entre MCE e CLP, adaptando o testador previamente desenvolvido no grupo para interagir via OPC com um simulador de CLP comercial. Entre o testador e o simulador foi construída uma interface gráfica que permite ao usuário realizar os testes manualmente sobre a MCE, iniciar a execução do procedimento automático de teste e visualizar os resultados de não-conformidade (Figura 3).

Para avaliação do protótipo em uma

bancada real em laboratório, realizou-se o projeto de um SIS para a Unidade de Experimentação de Escoamento Multifásico (UEEM) da UFSC, aplicando-se as técnicas LOPA e HAZOP para a análise de camadas de proteção e avaliação de riscos. Com isso, criou-se a especificação detalhada do SIS e dos procedimentos de operação, para posterior implementação em CLP e aplicação do método proposto através do protótipo de editor de MCE e testador automático de CLP. Em várias rodadas de interação com engenheiros da UO-RIO, do CENPES e da Engenharia de Abastecimento da Petrobras, foram realizadas provas de conceito com as ferramentas de edição de MCE e teste de CLP em desenvolvimento, levantados novos requisitos funcionais e implementadas novas versões do protótipo, cujo programa foi registrado no INPI com o apoio da Secretaria de Inovação da UFSC (SINOVA).

Uma primeira versão funcional do programa foi então aplicada para realizar testes automáticos em campo com a lógica da P-40 configurada em PLCs da Rockwell. O protótipo foi capaz de identificar os erros introduzidos na lógica deliberadamente para fins de avaliação, incluindo erros de temporização. Após a implementação de novas melhorias, as ferramen-

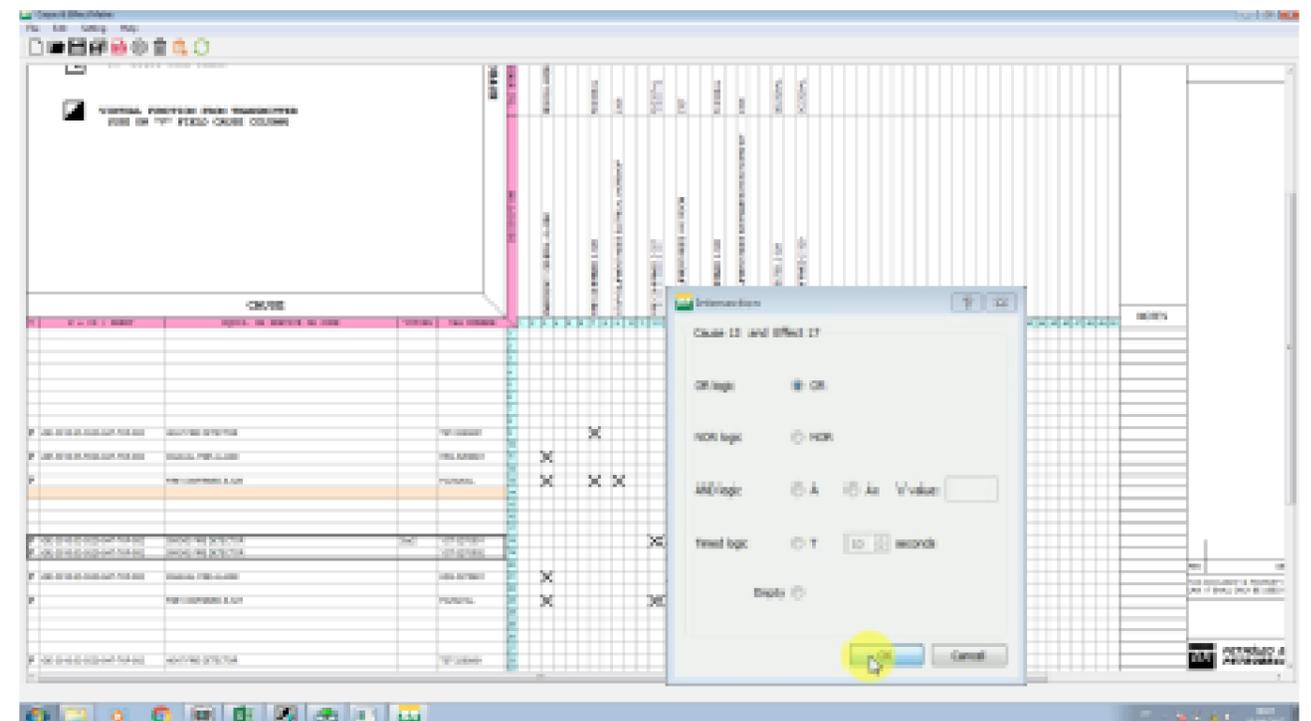


Figura 2: Tela principal do Editor de MCE/

tas de edição e teste automático foram aplicadas em dois pilotos para analisar a sua efetividade. O primeiro piloto compreendeu o Teste de Aceitação da Matriz Causa e Efeito do sistema FGS da plataforma P74. Após inserir a MCE com 11 páginas no editor, o protótipo executou automaticamente com sucesso uma bateria de 400 testes no CLP. O segundo piloto compreende o Teste de Aceitação da Matriz Causa e Efeito dos sistemas PCS e FGS da plataforma P68 utilizando a giga de teste padrão da Petrobras para controladores da marca Yokogawa. A partir das 84 páginas da MCE, o testador selecionou e executou automaticamente 1498 testes no sistema.

Neste projeto foram desenvolvidos métodos avançados de teste, verificação formal e síntese de programas de CLPs de segurança que ajudam a evitar falhas em sistemas de controle e automação de processos produtivos do setor de petróleo e gás. Esses resultados atingiram diferentes graus de desenvolvimento tecnológico na medida que foram validados em modelos matemáticos, em simulações, em processos de laboratório ou mesmo em CLPs de plataformas de produção offshore. A expectativa é que essas tecnologias possam ser efetiva-

mente incorporadas às práticas de engenharia do setor, ajudando a melhorar a segurança de processos e, conseqüentemente, a reduzir as perdas econômicas, sociais e ambientais causadas por acidentes.

A adoção de ferramentas de edição de MCE e teste automático de CLPs para sistemas de segurança está em consonância com as estratégias de inovação tecnológica e desenvolvimento do setor de petróleo e gás natural, com foco em “tecnologias e práticas que propiciam aumento da segurança de processo, da capacidade de gerenciamento da integridade e da confiabilidade das instalações e equipamentos, privilegiando a continuidade operacional dos processos” (Petrobras. Nossas atividades: Tecnologia e Inovação. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/tecnologia-e-inovacao/> Acesso em 11/6/2021). Tais tecnologias contribuem ao processo de transformação digital dos sistemas de gestão de segurança operacional segundo as melhores práticas de engenharia na proteção da saúde humana, do meio ambiente, das instalações e da produção de petróleo e gás. Além da redução de acidentes, a melhoria da gestão de riscos pode refletir na redução dos

altos custos com apólices de seguros neste setor.

Não menos importante que o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, esse projeto contribuiu significativamente para a formação de recursos humanos altamente qualificados para o setor de petróleo e gás natural. Ao longo dos cinco anos deste projeto, doze estudantes de Engenharia de Controle e Automação da UFSC puderam complementar sua formação com atividades de pesquisa e desenvolvimento nas diferentes linhas deste projeto. Além disso, cinco mestrandos e um pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da UFSC desenvolveram suas dissertações em temas relacionados ao projeto. Destaca-se ainda a importância deste projeto de pesquisa para a capacitação dos cinco professores do DAS-UFSC envolvidos, seja pela oportunidade de conhecer as práticas e os desafios de engenharia na indústria de óleo e gás, seja pelo fortalecimento da cooperação científica com os pesquisadores do CENPES/PETROBRAS e do LAAS-CNRS, na França. A infraestrutura de P,D&I do DAS-UFSC também se beneficiou pela aquisição de material permanente, softwares de CLP, construção de bancadas de teste e pela implantação do Sistema Instrumentado de Segurança na Unidade de Experimentação em Escoamento Multifásico da UFSC que continuará servindo de suporte para pesquisas avançadas em automação de sistemas para o setor de petróleo e gás natural.

Por mais que os protótipos desenvolvidos tenham demonstrado sua usabilidade, eficácia e viabilidade nos estudos de caso com as plataformas P74 e P68, a adoção destas ferramentas pelos engenheiros do setor requer uma série de serviços que transcendem a fase de P&D, tais como treinamento, suporte, customização, correção de erros, atualizações, etc. Neste sentido, o pós-doutorando Rodrigo Tacla Saad criou em 2019 a empresa VERTESIS como spin-off deste projeto de pesquisa com o objetivo de dar continuidade ao ciclo de vida de software do editor de MCE e testador automático de CLP num time de desenvolvedores

profissionais, de modo que a equipe de pesquisadores do DAS-UFSC possa focar em novas pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos na continuidade deste projeto. No final de 2020, a VERTESIS foi uma das 18 empresas vencedoras do edital Petrobras Conexões para Inovações – Módulo Startups, com um projeto que prevê atividades de desenvolvimento de software executadas exclusivamente por parte da VERTESIS, e atividades de pesquisa científica entre a VERTESIS e a UFSC para melhorar aspectos de performance da ferramenta.

Com o amadurecimento das ferramentas de edição de MCE e de teste automático estamos buscando expandir os métodos desenvolvidos em nosso projeto de P&D para outras fases do ciclo de desenvolvimento de sistemas críticos de automação. Os resultados das pesquisas exploratórias com métodos de *model-checking* para verificação formal e controle supervisorio para síntese de automatismos neste projeto indicam a sua aplicabilidade aos problemas do setor de petróleo e gás. Esses métodos permitem a certificação de propriedades baseada em modelos formais e a identificação de inconformidades antes de qualquer implementação, quando os custos para correção de erros são muito menores do que no TAF.

Assim, na continuidade desta pesquisa, estamos propondo um novo projeto de P&D com o objetivo geral de desenvolver métodos assistidos por computador baseados em métodos formais para apoio ao desenvolvimento de sistemas críticos de automação com integridade ao longo do ciclo de vida no setor de petróleo e gás. Pretende-se desenvolver novos métodos e ferramentas computacionais para teste automático e monitoramento de SIS explorando técnicas avançadas de *runtime verification* e diagnóstico de falhas, e para projeto de sistemas de automação assistido por métodos formais como *model-checking* e controle supervisorio. Espera-se que os resultados dessa pesquisa contribuam ao esforço estratégico de transformação digital do setor com soluções tecnológicas que auxiliem os engenheiros a melhorar a qualidade dos projetos e a aumentar a segurança e a eficiência das operações. ■

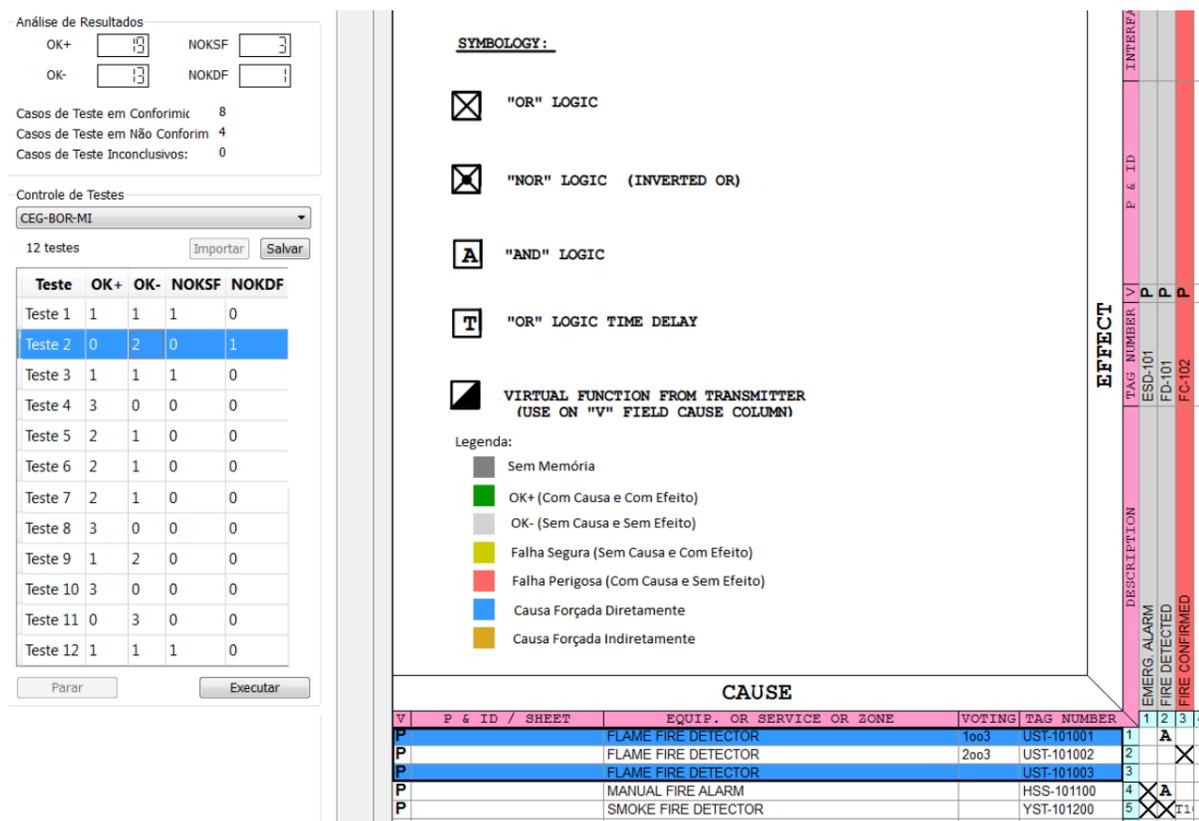


Figura 3: Tela principal do Testador Automático.

**Autores:** Daniel J. Pagano, Francisco R. M. da Mota e Marina E. Stasiak

## I. Escoamentos multifásicos em sistemas de produção de petróleo

Na produção de petróleo e gás tipicamente ocorrem escoamentos multifásicos de água, óleo e gás. A medição de vazão de cada componente (fração) é hoje, de maneira geral, realizada em separadores de teste. Medições em separadores de teste somente fornecem valores significativos para o regime estacionário de funcionamento de cada poço, sendo o tempo para se atingir esse regime bastante elevado. Além disso, existem desvantagens como a descontinuidade do processo de medição por separação e o elevado volume ocupado na unidade de produção. A medição sem separação através de medidores de vazão em escoamentos multifásicos é uma alternativa ao processo de separação. Em poços de alta produtividade, como os esperados para o Pré-Sal, os medidores multifásicos apresentam-se como ferramentas indispensáveis para o aumento da rentabilidade e da segurança operacional. A disponibilidade de informação em tempo real sobre a produção permite a otimização dos processos de gerenciamento e recuperação de reservatórios, assim como, uma rápida detecção de golfadas e de paradas de produção.

Os escoamentos multifásicos são caracterizados pelo fluxo simultâneo ao longo de uma tubulação de uma combinação de duas ou mais fases, como gás-líquido, líquido-líquido, líquido-sólido, gás-líquido-sólido e gás-líquido-líquido, que permanecem separadas. Diferentes combinações das fases dão origem a diferentes padrões de escoamento caracterizados por uma configuração geométrica das fases no duto. O comportamento do escoamento

geralmente determina a eficiência e a segurança das plantas e equipamentos onde o escoamento multifásico está presente. Portanto, o monitoramento e medição de tais escoamentos e parâmetros derivados é altamente desejado em muitas aplicações. Esta comunicação na revista do PPGEAS visa apresentar dois medidores de escoamento multifásico baseados em medições elétricas em desenvolvimento no Programa de formação de Recursos Humanos - PRH-2.1/ANP do Departamento de Automação e Sistemas (DAS). Cada instrumento oferece uma solução baseada em um princípio de operação diferente e que oferece um potencial para aplicações de campo ou para realizar uma investigação detalhada de um escoamento multifásico em uma planta piloto.

## II. O problema da medição multifásica

A fração volumétrica, que é definida pela razão entre o volume ocupado por uma fase específica e o volume total da mistura, é um parâmetro fundamental que aparece na maioria dos modelos de fluxo e frequentemente é aplicado para auxiliar rotinas de identificação de padrões de fluxo, bem como para estimar as taxas de fluxo de duas ou mais fases. Em escoamentos de duas fases gás-líquido, a fração de volume de gás é comumente chamada de *void fraction*; em fluxos de duas fases líquido-líquido, a fração de volume de líquido (água ou óleo, por exemplo) é comumente chamada de *hold-up*.

A vazão volumétrica *volumetric flow rate*) de um fluido monofásico é definida como

onde  $A$  é a área da seção transversal do

$$Q = \frac{dv}{dt} = vA \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

duto e  $v(t)$  é a velocidade do fluido. Se o escoamento é composto das fases óleo+água+gás então a velocidade do escoamento é a soma das velocidades de cada fase, i.e.,  $v=v_o+v_a+v_g$  e a vazão volumétrica será calculada por

$$Q = A(\alpha v_g + \beta v_a + \gamma v_o)$$

sendo  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ;  $\alpha$  fração de gás;  $\beta$  fração de água;  $\gamma$  fração de óleo;  $v_g$  velocidade do gás;  $v_a$  velocidade da água;  $v_o$  velocidade do óleo. Da soma das frações podemos deduzir que  $\gamma = 1 - (\alpha + \beta)$  e que

$$Q = A(\alpha v_g + \beta v_a + [1 - (\alpha + \beta)] v_o),$$

portanto somente duas frações são necessárias para calcular a vazão  $Q$  além de conhecer as velocidades de cada fase ( $v_g, v_a, v_o$ ) que necessariamente devem ser medidas e da área  $A$  que é conhecida.

A vazão mássica (*mass flow-rate*) para um escoamento monofásico se define como  $M = dm/dt = \rho v A$  com unidades de medição  $Kg/s$ , sendo  $\rho$  a densidade do fluido; e para um escoamento multifásico como

$$M = A(\alpha v_g \rho_g + \beta v_a \rho_a + [1 - (\alpha + \beta)] v_o \rho_o)$$

sendo  $\rho_g$  a densidade do gás;  $\rho_a$  a densidade da água e  $\rho_o$  a densidade do óleo.

A partir das equações anteriores pode-se entender a complexidade que existe na medição tanto da vazão volumétrica como da vazão mássica de um escoamento multifásico em um duto considerando os diferentes padrões de escoamento que podem coexistir. Entretanto, o conhecimento dos valores de cada fração das fases do escoamento multifásico é o fator chave para o cálculo destas vazões, uma vez que as outras medições podem ser realiza-

das com instrumentos convencionais.

Para a medição das frações volumétricas existem diversas técnicas que foram desenvolvidas baseadas em diferentes princípios, como (i) método da válvula de fechamento rápido, (ii) métodos de processamento de imagens, (iii) cavidades ressonantes de radio frequência (RF), (iv) tomografia computadorizada de raios X e raios-gama, (v) métodos de impedância elétrica e (vi) métodos combinados baseados nas técnicas anteriormente mencionadas. Dentre todos estes métodos, os baseados na medição da permissividade elétrica e da impedância elétrica em linha, sendo métodos não intrusivos, vêm ganhando terreno na medição das frações que compõem um escoamento multifásico. A chave destes métodos está baseada na caracterização e medição da permissividade elétrica (ou constante dielétrica) de um fluido. A permissividade elétrica de um material ( $\epsilon$ ) pode ser definida como a habilidade de um material ou substância para armazenar uma carga elétrica e portanto resistir ou impedir a geração e a propagação de um campo elétrico. A permissividade elétrica é usualmente expressa em relação à permissividade elétrica do vácuo ( $\epsilon_0 \approx 8.85 [pF/m]$ ), sendo definida a permissividade relativa como  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ . A tabela abaixo mostra os valores de  $\epsilon_r$  característicos das fases gás, óleo e água.

vácuo	$\epsilon_0/\epsilon_0=1$
Ar ou gás (hidrocarbonetos)	$\approx 1.0005$
Óleo cru (leve a pesado)	2.0–2.3
água	$\approx 80$

Lembrando que a capacitância se define

como  $C=\epsilon(A/d)$ , a tabela anterior basicamente nos permite concluir que a capacitância de um capacitor com dielétrico água é 80 vezes maior que a do gás e 40 vezes maior que a do óleo. Esta enorme diferença na permissividade relativa destes elementos é a razão pela qual a permissividade elétrica é um bom parâmetro de medição para distinguir água misturada com óleo e gás de hidrocarbonetos. Este princípio básico vem sendo pesquisado no DAS para desenvolver medidores da fração de água (*Water-cut sensors*) e medidores multifásicos para aplicações em dutos (de poços de petróleo, risers e oleodutos) de sistemas de produção na indústria do Petróleo. A seguir são brevemente apresentados estes medidores.

### III. Medidor de fração de água por cavidade ressonante de RF

Cavidades ressonantes de rádio frequência (RF) são dispositivos metálicos onde a energia é armazenada nos campos eletromagnéticos dentro deles. A ressonância ocorre quando a energia média armazenada no campo elétrico é igual à energia média armazenada no campo magnético, resultando em uma concentração máxima de energia no interior da cavidade.

A geometria da cavidade, bem como as

características dielétricas do material dentro dela, definem sua frequência de ressonância. A frequência de ressonância é usada como parâmetro de medição e está relacionada a diferentes grandezas de medição, por exemplo, a fração de água em fluxos de duas fases. Medições utilizando misturas estratificadas água / óleo e água / ar com água doce e água do mar foram realizadas em [1] mostrando que esta tecnologia apresenta parâmetros metrológicos adequados para esta aplicação. Em [2], redes de casamento de impedância para o sensor de cavidade ressonante apresentado em [1] foram implementadas a fim de melhorar a qualidade das medições. O sensor de cavidade ressonante consiste em um duto de PVC dentro de um cilindro metálico, como mostrado em detalhes na Fig. 1. A frequência de ressonância  $f_r$ , considerando o modo de propagação  $TE_{111}$ , é dada por

$$f_r = \frac{k c}{\sqrt{\epsilon_m}}$$

sendo  $k=5.69 m^{-1}$  uma constante dependente

da geometria da cavidade,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, e  $\epsilon_m$  a permissividade efetiva da mistura fluindo dentro da tubulação de PVC do sensor que é uma função da fração de água.

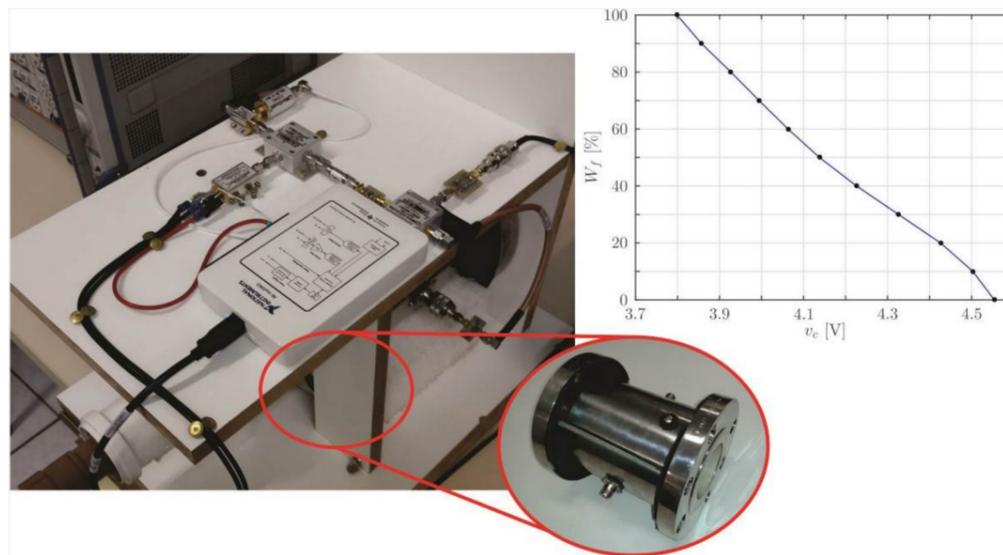


Fig. 1: Medidor de fração de água por cavidade ressonante acoplado ao circuito de medição e resposta do sistema.

Então, a frequência de ressonância em função da permissividade efetiva, é medida por um circuito externo usando a amplitude ou informação de fase do sinal de transmissão. Por fim, a informação é tratada por uma etapa de processamento digital de sinais e é relacionada à fração de água que se quer medir. A Fig. 1 mostra o sensor (em detalhes) acoplado ao circuito, que consiste em um mecanismo de PLL (*phase locked-loop*), onde a frequência de ressonância é rastreada de acordo com o deslocamento de fase causado pela fração de água fluindo dentro do duto de PVC. À direita podemos ver a curva de resposta do sistema que relaciona o sinal de tensão de saída do circuito com a porcentagem de água. Esta curva pode ser identificada e aproximada por uma equação polinomial de quarta ordem.

### IV. Medidor multifásico ECTM

A tomometria de capacitância elétrica (Electrical capacitance tomometry-ECTM) fornece um meio eficaz para monitorar frações volumétricas de água em escoamentos multifásicos. A seguir, apresentamos um novo método de medição da fração de volume de água com base na tomografia de capacitância elétrica [3]. Uma estratégia de combinação de eletrodos usando eletrodos rotativos foi implementada para transformar um sensor de 12 eletrodos em um sensor de 2 eletrodos, melhorando a relação sinal-ruído (SNR) e simplificando o circuito de hardware de medição. Os resultados experimentais obtidos em uma planta de laboratório de escoamento multifásico nos permite avaliar o desempenho do método de medição da fração volumétrica de água proposto. Em métodos convencionais de medição de fração volumétrica com base em ECT, os valores de fração volumétrica são estimados pelas imagens de seção transversal da distribuição de permissividade do escoamen-

to de duas fases. Uma imagem de alta qualidade é necessária para determinar com precisão a fração de volume. Considerando que a reconstrução de uma imagem de alta qualidade requer um algoritmo de reconstrução de imagem complexo e demorado resulta difícil atender os requisitos em tempo real da medição em linha.

Ao contrário da estratégia de eletrodos combinados aplicada ao sensor ECT, no método proposto o número de eletrodos agrupados é fixo, formando apenas dois eletrodos conforme ilustrado na Fig. 2. Assim, a relação sinal-ruído (SNR) permanece a mesma do sensor de dois eletrodos. Após medir o valor da capacitância (ver Configuração 1 na Fig. 2), os eletrodos são recombinados como mostrado na Configuração 2 (Fig. 2). O mesmo procedimento de medição é realizado até que as  $N$  (número total de eletrodos não combinados) rotações sejam implementadas. Para o sensor desenvolvido, o número disponível de medições de capacitância é 12. O mesmo sinal de excitação é aplicado a seis eletrodos, enquanto os seis eletrodos restantes são conectados ao

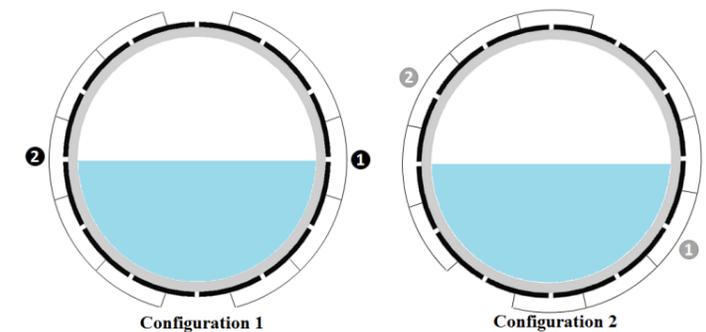


Fig. 2: Diferentes configurações de eletrodos no sensor ECTM.

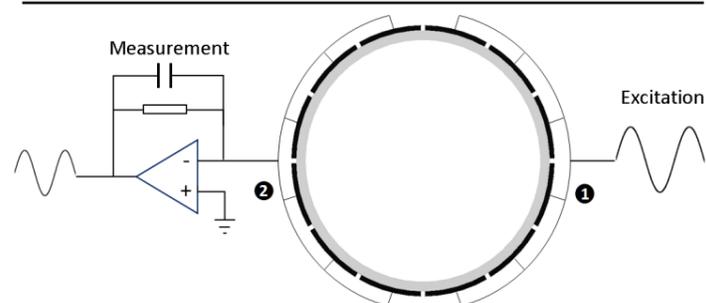


Fig. 3: Sistema ECTM com configuração de 12-eletrodos, sinal de excitação e circuito de medição.

circuito de medição conforme ilustrado na Fig. 3. Depois de realizar  $N$  medições de capacitância, o método de reconstrução de imagens Landweber iterativo (software) é usado para estimar os valores da distribuição de permissividade normalizada ou valores dos pixels normalizados,  $\hat{g}(i)$  e a fração volumétrica de água é calculada utilizando a seguinte equação

$$\Phi = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left( \frac{\hat{g}(i)}{\hat{g}^h(i)} \right)$$

onde  $\Phi$  é a fração volumétrica,  $M$  representa o número total de pixels,  $\hat{g}(i)$  é o valor do  $i$ -ésimo pixel, e  $\hat{g}^h$  é o valor do  $i$ -ésimo pixel quando o sensor está cheio com o material de mais alta permissividade elétrica (nominalmente 1).

## V. Resultados experimentais do medidor ECTM

Experimentos foram realizados para avaliar o desempenho do método proposto usando padrões de fluxo estratificados estáticos e dinâmicos. O sensor ECTM é construído em um duto de polipropileno de 76 mm de diâmetro. Os doze eletrodos são fixados na superfície externa do duto; cada um cobre 28° ao longo da circunferência e 100 mm ao longo da direção axial. Em cada extremidade dos eletrodos, uma folha de cobre circular de 50 mm de largura é fixada como eletrodos de proteção aterrados. Envolvendo uma parte externa do sensor, uma blindagem aterrada foi montada para proteger o circuito de campos eletromagnéticos externos. O sistema ECTM inclui o gerador de onda senoidal de 500 kHz, controle de eletrodos e módulos de aquisição de dados (DAQ National Instruments). A placa NI PCI6259 DAQ foi usada para enviar comandos de controle de comutação para o circuito e adquirir o sinal de tensão de corrente alternada proporcional à capacitância.

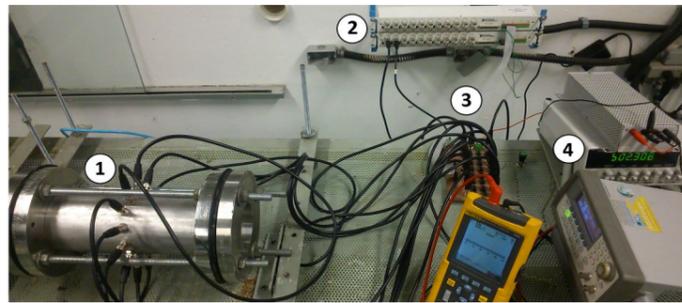


Fig. 4: Experimento estático do protótipo do medidor ECTM. (1) Sensor ECTM. (2) Sistema de aquisição de dados. (3) Módulo de controle de eletrodos. (4) Gerador de sinais.

### A. Experimentos estáticos

Experimentos estáticos foram realizados usando água corrente (permissividade relativa = 80) e óleo lubrificante (Texaco Spindura 10, permissividade relativa = 2) para compor um fluxo estratificado estático. A fração de volume de água estimada para um intervalo de 0-100% é mostrada na Fig. 5.

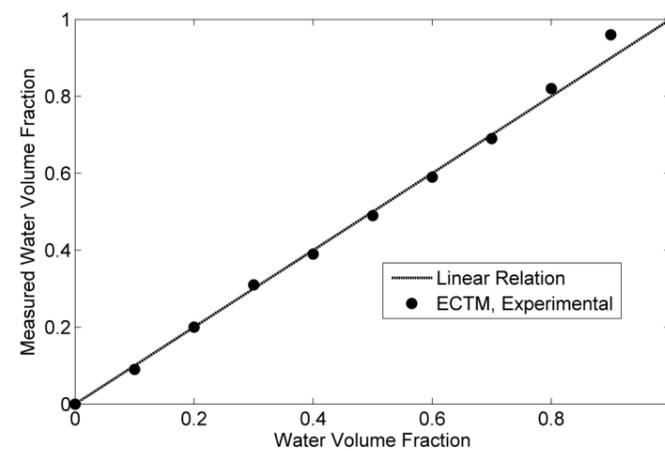


Fig. 5: Resultados experimentais caso estático para escoamento estratificado óleo-água.

### B. Experimentos dinâmicos

A unidade experimental existente no Laboratório Experimental de Escoamento Multifásico (LEEM) do DAS é capaz de fornecer escoamentos de ar-água, óleo-água, ar-óleo-água, anulares, tipo bolhas e estratificados. Este laço de escoamento multifásico tem um diâmetro interno de 3 polegadas e uma seção de teste de 5 m de comprimento. Uma gama de equipamentos de teste auxiliares está disponível para uso no laço de escoamento multifásico, incluindo separador de gás-líquido (1), tanque de

água (2, 3), compressor de ar (5), separador de água-óleo (6), bomba de água (7, 8), medidor de fluxo eletromagnético (9), medidor de fluxo de turbina (10), sensores de pressão diferencial (1, 4), sensores de temperatura (4) e sensor ECTM (11). Um diagrama esquemático das instalações da unidade experimental é mostrado na Fig. 6. A mistura do escoamentos de ar e de água na seção de teste passa horizontalmente através da seção do sensor, conforme mostrado na Fig. 7. Para cada teste experimental, a fração de volume real de água foi estimada usando o método da válvula de fechamento rápido. A fração de volume de água estimada é representada na Fig. 8. Neste artigo, foi realizada uma breve revisão sobre o panorama da pesquisa no DAS na área de instrumentação de escoamentos multifásicos, em particular para aplicações nos sistemas de produção de petróleo. Foram apresentados dois sistemas de medidores baseados em princípios diferentes para monitoramento da fração de água e do escoamento multifásico a partir de medições elétricas. O primeiro medidor apresentado permite medir o conteúdo de água em um escoamento de óleo-água através de um sensor de cavidade ressonante de rádio frequência. Um segundo medidor baseado em múltiplas medições de capacitância, conhecido como sensor ECTM, permite determinar as

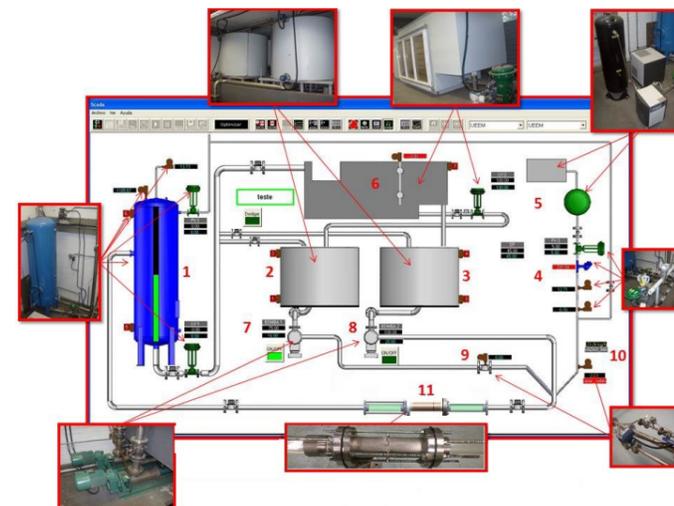


Fig. 6: Planta de escoamento multifásico no LEEM.

frações em um escoamento multifásico gás-água ou óleo-água.

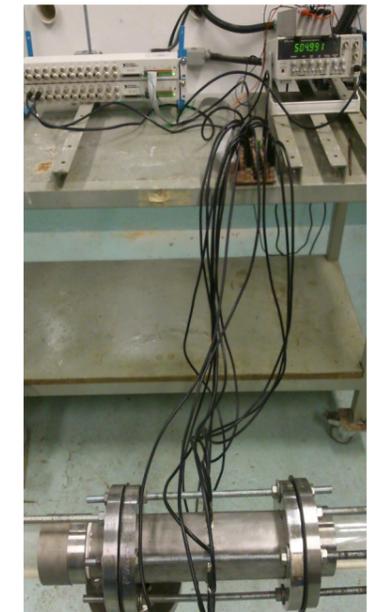


Fig. 7: Experimento dinâmico. Sistema ECTM implementado no laço multifásico.

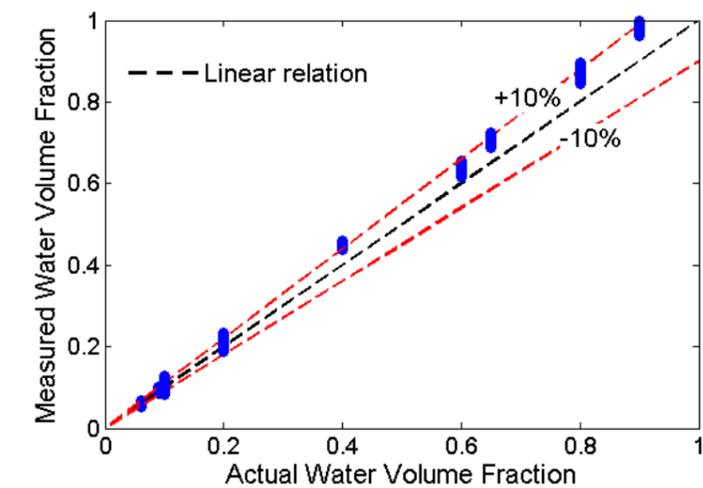


Fig. 8: Resposta do sistema ECTM em resultados experimentais dinâmicos para escoamento estratificado ar-água.

- [1] Avila H. E. L., De Andrade, G. A., De Souza F. R., Pagano, D. J. Modeling and Analysis of a PLL Based Resonant Frequency Tracking System Using a Resonant Cavity Sensor. IEEE SENSORS JOURNAL, v. 19, n. 17, pp. 7447-7459, 2019.
- [2] Avila H. E. L., Pagano D. J., de Sousa F. R., Improving the performance of an RF resonant cavity water-cut meter using an impedance matching network, FLOW MEAS. INSTRUM., vol. 43, pp.14-22, 2015.
- [3] Da Mota F. R. M., Pagano D. J., Stasiak, M. E. Water Volume Fraction Estimation in Two-Phase Flow Based on Electrical Capacitance Tomometry. IEEE SENSORS JOURNAL, v. 18, n. 16, pp. 6822-6835, August, 2018.

# Um algoritmo de Controle de Golfadas para aumentar 10% a Produção de Poços de Petróleo

**Autores:** Agostinho Plucenio (*in memorian*), Daniel J. Pagano e Marina E. Stasiak

## I. O problema das golfadas em sistemas de produção

As golfadas (oscilações de vazão nos escoamentos multifásicos) são reconhecidas como fonte de problemas em sistemas de produção de petróleo (vide Fig. 1). O processo de tratamento do escoamento multifásico primário (água, óleo, gás), incluindo separação óleo-água-gás e compressão de gás, é fortemente afetado por este tipo de oscilações. Em casos extremos, parte do gás produzido deve ser direcionado para ser queimado no *flare* e a qualidade da água e óleo separados fica comprometida. Além disso, os risers de produção podem sofrer com a aceleração do fluido, resultando em fadiga mecânica prematura. Vale ressaltar também a perda de produção decorrente do escoamento intermitente quando



Fig. 1: Unidade flutuante de produção (Floating Production Storage and Offloading - FPSO) é um tipo de navio utilizado pela indústria do petróleo para a produção, armazenamento e transferência de petróleo. Na figura são mostrados os risers de conexão entre a FPSO e as cabeças dos poços.

comparado ao regime de escoamento estabilizado.

Os esforços para lidar com este problema podem ser divididos em dois tipos de soluções propostas: (i) controle reativo e (ii) controle ativo. O *controle reativo* é o nome usado para descrever os sistemas projetados com base no pressuposto que os risers e poços desenvolvem algum tipo de oscilação na vazão. Este sistema é projetado para permitir o processamento do escoamento primário, mesmo com a existência de comportamentos de vazão oscilatórios. O sistema de *controle ativo*, por outro lado, atua para eliminar ou diminuir as oscilações de vazão nos escoamentos multifásicos entregues pelos poços e risers. Os ganhos econômicos decorrentes da aplicação destes métodos de controle ativo podem chegar a ser muito expressivos. Entretanto, na indústria do petróleo, o número de aplicações de controle ativo é ainda reduzido. Isto pode ser atribuído a: (i) falta de instrumentação instalada para medição e atuação; (ii) falta de confiabilidade na robustez dos algoritmos de controle; (iii) dificuldade em escolher os *set-points* de operação do sistema de produção.

Nos últimos anos, vários algoritmos de controle ativo foram propostos para o controle da dinâmica da vazão de poços e risers. Em Plucenio *et al.* [2, 3] foi proposto um algoritmo de controle de golfadas que não necessita fixar nenhuma referência (*set-point*) para as variáveis do processo, em particular para a pressão de fundo do poço. No seu lugar utiliza-se uma referência nula para a derivada da pressão de fundo. Este algoritmo de controle foi aplicado com sucesso em simulações e, em

particular, foi aplicado a um poço real em águas ultraprofundas da Petrobras (1850m de lâmina de água) conectado a uma plataforma na bacia de Campos, acionado com válvula de controle de produção (*production choke valve*) para mitigar a propagação das oscilações de vazão no sistema de produção. Como resultado, o poço atingiu 10% de aumento na produção de petróleo, mantendo o fluxo livre de golfadas severas, o que significou um incremento de cerca de 240 barris por dia para aquele poço específico. Considerando o preço do petróleo bruto a US\$ 60 o barril, o retorno financeiro dessa solução específica de controle seria de mais de US\$ 5 milhões ao ano [1]. Este artigo de divulgação na revista do PPGEAS tem como objetivo apresentar o algoritmo de controle de golfadas mencionado anteriormente, desenvolvido no Programa de formação Recursos Humanos - PRH-2.1/ANP do Departamento de Automação e Sistemas (DAS). Este documento foi elaborado baseado nos artigos [1-4].

## II. A derivação da lei de controle

A ideia básica baseia-se na seguinte premissa: “Estabilizando a pressão de fundo do poço em um escoamento gás-líquido, se consegue estabilizar a fração de gás e portanto suprimir ou mitigar as golfadas no sistema de produção” [4]. A seguir vamos mostrar como isto é possível. Inicialmente consideraremos a diferença entre a pressão de fundo  $p(z + \Delta z, t)$  e a pressão no topo  $p(z, t)$  de uma seção de duto de comprimento  $\Delta z$ , com inclinação  $\theta > 0$  em relação ao eixo horizontal, onde tem lugar um escoamento gás-líquido (vide fig. 2).

Assumimos que a pressão no topo é uma condição de contorno constante e que não existe intercâmbio de massas entre as fases líquido e gás. Além disso desprezamos a queda

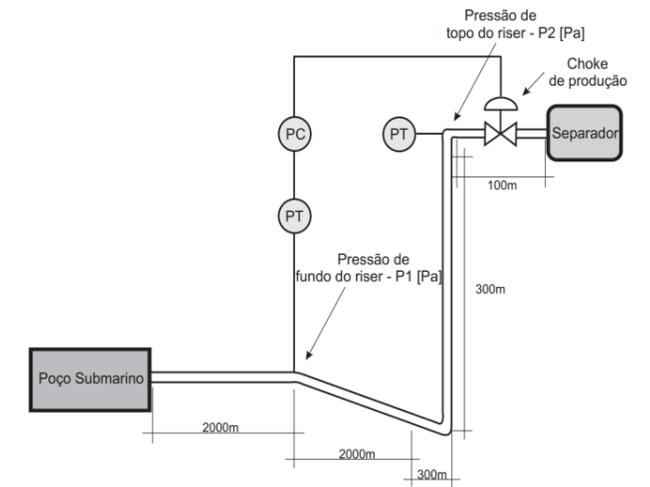


Fig. 2: Sistema de produção poço + riser + separador mostrando as variáveis do processo e o sistema de controle atuando no choke de produção.

de pressão devida ao atrito nas paredes do duto e assumimos que a fração de gás (*gas-void fraction*) é definida por  $a(t)$ , e que a densidade do gás  $\rho_g$  não varia ao longo de  $\Delta z$ . A queda de pressão pode ser expressa como

$$p(z + \Delta z) = p(z, t) + [\alpha(t)\rho_g + (1 - \alpha(t))\rho_l] g \Delta z \sin(\theta). \quad (1)$$

A densidade do gás é dada por

$$\rho_g(t) = \frac{p(z + \Delta z, t) + p(z, t)}{2} \phi$$

com  $\phi = M/(ZRT)$ . A partir destas definições a eq. (1) se reescreve como

$$p(z + \Delta z, t) = p(z, t) + \alpha(t) \frac{(p(z + \Delta z, t) + p(z, t))}{2} \phi g \Delta z \sin(\theta) - \alpha \rho_l g \Delta z \sin(\theta) + \rho_l g \Delta z \sin(\theta) \quad (2)$$

a derivada da equação (2) é

$$\frac{\partial p(z + \Delta z, t)}{\partial t} = \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} \left( \frac{(p(z + \Delta z, t) + p(z, t))}{2} \phi - \rho_l \right) g \Delta z \sin(\theta) + \frac{\partial p(z + \Delta z, t)}{\partial t} \frac{\phi}{2} \alpha(t) g \Delta z \sin(\theta), \quad (3)$$

ou então

$$\frac{\partial p(z + \Delta z, t)}{\partial t} \left[ 1 - \frac{\phi}{2} \alpha(t) g \Delta z \sin(\theta) \right] = \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} \left[ \frac{(p(z + \Delta z, t) + p(z, t))}{2} \phi - \rho_l \right] g \Delta z \sin(\theta). \quad (4)$$

A ideia básica para eliminar ou mitigar as oscilações da vazão (golfadas) é forçar a seguinte condição

$$\frac{\partial p(z + \Delta z, t)}{\partial t} = 0.$$

Assumindo que  $1 - (\varphi/2)a(t)g\Delta z \sin(\theta) \neq 0$  existem duas alternativas para que  $\partial p(z + \Delta z, t)/\partial t = 0$ , i.e., (i)  $\partial a(t)/\partial t = 0$  ou (ii)  $((p(z + \Delta z, t) + p(z, t))/2)\varphi - \rho_l = 0$ . A segunda alternativa implica que a densidade do gás é igual à densidade do líquido, i.e.,  $\rho_g = \rho_l$ , claramente esta alternativa não pode ser assumida verdadeira e portanto será descartada. Portanto para se ter

$$\frac{\partial p(z + \Delta z, t)}{\partial t} = 0$$

é necessário impor que

$$\frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} = 0.$$

### III. Algoritmo de controle de golfadas

A estratégia de controle de golfadas ou controle *anti-slug* para estabilizar as oscilações da vazão do escoamento multifásico consiste em forçar

$$\frac{\partial p(z + \Delta z, t)}{\partial t} = 0.$$

Além disso se utiliza um modelo de referência cuja resposta é oscilatória e não se considera a fixação de qualquer *set-point* de referência da pressão de fundo para projetar a lei de controle.

A seguir assumimos que a pressão de fundo é  $p_b(t) = \bar{p} + \tilde{p}(t)$  e utilizamos um filtro passa-altas (filtro *washout*) para remover o valor médio  $\bar{p}$  e trabalhar somente com as variações da pressão  $\tilde{p}(t)$ . Também se assume que o riser ou a cabeça do poço está conectado a um separador através de uma

válvula de controle (choke de produção) como mostrado na fig. 2. Então a pressão no topo se define como  $p_h(t) = p_{sep} + p_{ch}(t)$  e a variação  $\Delta p_h = \Delta p_{ch}$ . Uma variação na pressão de topo  $\Delta p_h$  provocará uma oscilação na pressão  $\tilde{p}(t)$ . Esta dinâmica pode ser modelada mediante a seguinte função de transferência  $\tilde{p}_b(s) = H(s) \Delta p_{ch}(s)$ , sendo

$$H(s) = \frac{A\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (5)$$

O parâmetro  $A$  na equação (5) representa um ganho e foi incluído em  $H(s)$  para se ter um melhor ajuste dos parâmetros do controlador. O parâmetro  $\omega_0 = (2\pi)/T_0$  representa a frequência do sinal oscilatório da pressão de fundo. A equação (5) pode ser discretizada resultando em

$$H(z) = \frac{A\omega_0}{(z-1) - (1-z^{-1}) + \omega_0^2} \quad (6)$$

ou

$$H(z) = \frac{A\omega_0 z^{-1}}{1 - (2 - \omega_0^2)z^{-1} + z^{-2}} \quad (7)$$

A função de transferência discreta da equação (7) é uma aproximação da expressão exata dada por

$$H(z) = \frac{A \sin(\omega_0) z^{-1}}{1 - 2 \cos(\omega_0) z^{-1} + z^{-2}} \quad (8)$$

para valores pequenos de  $\omega_0$ , sendo  $\sin(\omega_0)$  e  $\cos(\omega_0)$  aproximados respectivamente por expansões da série de Taylor de primeira e segunda ordem ao redor de zero. A equação a diferenças discretas da eq. (7) é

$$\Delta p_{ch}(k) = \frac{1}{A\omega_0} \tilde{p}_b(k+1) - \frac{(2 - \omega_0^2)}{A\omega_0} \tilde{p}_b(k) + \frac{1}{A\omega_0} \tilde{p}_b(k-1). \quad (9)$$

Definindo a referência para  $p_b = 0$ , o erro pode ser expresso como  $e(k) = -\tilde{p}_b(k)$ . Substituindo

do  $e(k)$  na eq. (9) temos que

$$\Delta p_{ch}(k) = \frac{-1}{A\omega_0} e(k+1) + \frac{(2 - \omega_0^2)}{A\omega_0} e(k) - \frac{1}{A\omega_0} e(k-1). \quad (10)$$

Na eq. (10) os termos  $e(k)$  e  $e(k-1)$  são conhecidos entretanto  $e(k+1)$  não é conhecido no tempo  $k$ . Então  $\Delta p_{ch}(k)$  se calcula forçando que  $e(k+1) = Ge(k)$  com  $0 < G < 1$ . Para maiores detalhes sobre este passo no desenvolvimento do algoritmo de controle ver [2], [3]. Nestes trabalhos, foi demonstrado que o valor de  $\Delta p_{ch}(k)$  que força esta condição garante a estabilidade do processo de escoamento. Substituindo esta expressão na eq. (10), tem-se

$$p_{ch}(k) = p_{ch}(k-1) + \frac{(2 - G - \omega_0^2)}{A\omega_0} e(k) - \frac{1}{A\omega_0} e(k-1). \quad (11)$$

Comparando a eq. (11) com a expressão de um controlador proporcional + integral (PI) podemos deduzir que

$$K_c = \frac{1}{A\omega_0}$$

e

$$T_i = \frac{T_s}{1 - G - \omega_0^2}$$

sendo  $T_s$  o período de amostragem,  $K_c$  é o ganho proporcional e  $T_i$  o tempo integrativo.

Como mostrado em [2], [3] a expressão final do algoritmo de controle tem mais um termo adicional que forçará com uma dinâmica lenta a abertura do choke de produção para o valor ótimo que maximize a produção. Para tal se utiliza um modelo aproximado da dinâmica do choke de produção. O algoritmo com este termo adicional resulta em

$$p_{ch}(k) = p_{ch}(k-1) + \frac{(2 - G - \omega_0^2)}{A\omega_0} e(k) - \frac{1}{A\omega_0} e(k-1) + \beta (p_{ch}^{des} - p_{ch}(k-1)) \quad (12)$$

sendo o valor desejado  $p_{ch}^{des} = \frac{B}{\phi_{ch}^2}$

O valor de  $B$  é calculado inicialmente a partir da média das medições da pressão e da abertura do choke de produção, como segue  $B = p_{ch}/\phi_{ch}$ . Este valor se pode atualizar a partir das medidas destas variáveis. O valor do parâmetro  $G$  pode ser ajustado a partir do conhecimento do valor do período de oscilação  $T_{osc}$  do sinal da pressão  $p_{ch}$  e do tempo de amostragem  $T_s$ , utilizando a seguinte expressão  $G = e^{-T_s/T_{osc}}$ . Por outro lado, o ajuste do valor do parâmetro  $\beta$  é crítico para alcançar os dois principais objetivos da lei de controle: (i) conduzir a variação de pressão  $\Delta p_b = 0$  e (ii) levar a abertura do choke de produção ao valor desejado. Portanto, o valor do parâmetro  $\beta$  deve ser otimizado para cumprir estes dois objetivos.

A lei de controle final é dada por

$$p_{ch}(k) = p_{ch}(k-1) + \gamma_0 e(k) - \gamma_1 e(k-1) + \beta (p_{ch}^{des} - p_{ch}(k-1)) \quad (13)$$

com  $\gamma_0 = K_c \left(1 + \frac{T_s}{T_i}\right)$ ,  $\gamma_1 = K_c$ .

### IV. Resultados obtidos

O algoritmo de controle foi testado em um cenário simulado composto pelo modelo de um riser conectado a um separador através de um choke de produção na superfície. O modelo simplificado de riser foi proposto por Meglio et al. [5]. Os parâmetros do sistema simulado são dados na Tabela 1.

#### A. Ajuste dos parâmetros do controlador

Na fig. (3) apresentam-se resultados de simulação onde se pode observar o comportamento dinâmico da pressão de fundo e da pressão do topo, junto com a vazão mássica do gás para abertura de 100% do choke de produção. A partir dos dados extraídos destes resultados:  $T_{osc}$  período de oscilação em malha aberta;  $x_1$  máximo valor da pressão de fundo do riser;  $x_2$  mínimo valor da pressão de fundo do riser;  $y_1$

Symb.	Description	Value
$\rho_l$	Liquid density	$[887.15 \text{ Kg/m}^3]$
$H_h$	Riser horizontal length	$[800 \text{ m}]$
$H_v$	Riser height	$[1200 \text{ m}]$
$D$	Riser int. diameter	$[0.1024 \text{ m}]$
$\theta$	Riser inclination	$[\pi/2 \text{ rad.}]$
$P_{sep}$	Separator pressure	$[689476 \text{ Pa}]$
$C_g$	Virtual valve constant	$[0.0004495 \text{ kg/sPa}^{0.5}]$
$C_c$	Production choke constant	$[0.003 \text{ kgs}^{-1} \text{ Pa}^{-0.5}]$
$\epsilon$	Gas frac. by-passing bubble	$[0.02 -]$
$V_{eb}$	Volume of elong. bubble	$[6.4859 \text{ m}^3]$
$V_r$	Riser volume	$[9.7288 \text{ m}^3]$
$\tau_{ch}$	Choke time constant	$[10 \text{ s}]$
$w_g^{in}$	Gas flow-rate entering riser	$[0.2 \text{ kg/s}]$
$w_l^{in}$	Liq. flow-rate entering riser	$[20 \text{ kg/s}]$
$m_{lr}$	Init. riser liquid mass	$[5.695E + 3 \text{ kg}]$
$m_{gr}$	Init. riser gas mass	$[24.148 \text{ kg}]$
$m_{eb}$	Init. gas mass in elong. bubble	$[384.07 \text{ kg}]$
$p_r^{bh}$	Init. riser bottom pressure	$[8.02E + 6 \text{ Pa}]$
$p_r^{top}$	Init. riser top pressure	$[1000000 \text{ Pa}]$
$p_{eb}$	Init. pressure in elong. bubble	$[8.116E + 6 \text{ Pa}]$

Tabela 1: Parâmetros do sistema simulado.

máximo valor da pressão de topo do riser;  $y_2$  mínimo valor da pressão de topo do riser;  $y_B$  valor médio da pressão de topo do riser,  $u_{ch}$  abertura do choke; é possível ajustar os principais parâmetros do controlador.

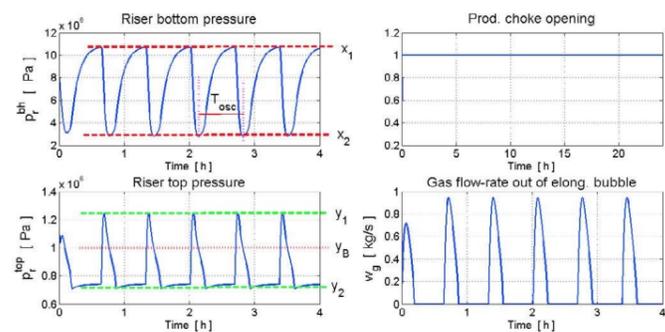


Fig. 3: Resultados de simulação do sistema em malha aberta a partir do qual se calculam os parâmetros da lei de controle.

Para tal, primeiro definimos o período de amostragem  $T_s=30s$ . Os parâmetros da lei de controle são calculados como mostrado a se-

guir:

$$\omega_0 = \frac{2\pi T_s}{T_{osc}} = 0.0785, A = \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} = 8.2, a = \frac{-5T_s}{0.5T_{osc}} = -0.125, G = e^a = 0.8825, T_i = \frac{T_s}{1 - G - \omega_0^2} = 269.5,$$

$$\beta = 1 - \frac{1}{(2 - G - \omega_0^2)^{1/k}} = 0.1. \quad (14)$$

A abertura desejada para o choke de produção é 70%. O ganho do controlador foi escolhido de forma conservativa  $K_c = (0.5)/(A \omega_0) = 0.775$ .

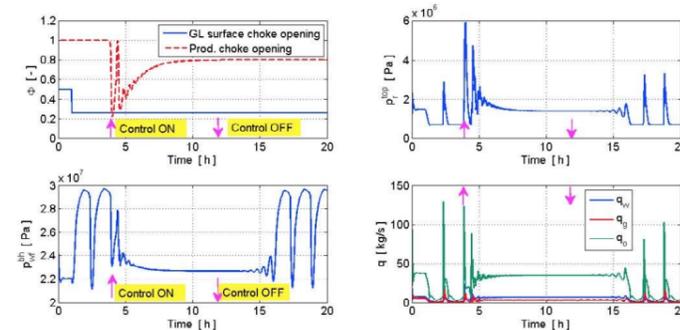


Fig. 4: Resultados de simulação do sistema em malha fechada com o algoritmo de controle proposto.

## B. Resultados de simulação

A fig. (4) mostra os resultados com o controlador proposto. A simulação inicia com abertura do choke a 70% sem controle aplicado. Observa-se a resposta oscilatória do sistema. No tempo  $t=5.1h$ , o controle é ativado. A abertura do choke de produção reage primeiro com um valor de 100% e logo decresce a um valor menor e desde esse cresce até atingir o valor da posição desejada. No intervalo  $12.0 < t < 12.83 h$ , foi simulada uma perturbação com um incremento de 5% do valor nominal na pressão do separador. A abertura do choke varia até estabilizar a pressão de fundo e a vazão do líquido. A fig. (5) mostra os resultados com o controle proposto, com  $\beta$  calculado através da eq. (14) e  $K=0.5$ . Comprova-se que a abertura desejada do choke de produção é alcançada em um tempo menor quando comparada com o resultado da fig. (4).

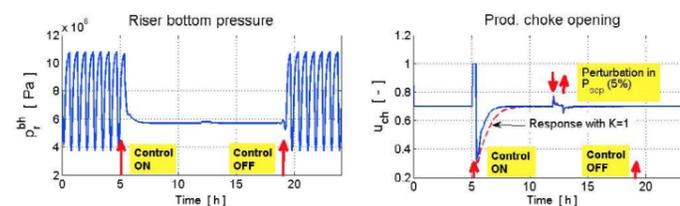


Fig. 5: Resultados de simulação do sistema em malha fechada com o controle proposto com  $\beta$  calculado com a eq. (14) e  $K=0.5$ .

## V. Comentários finais

A aplicação de técnicas de controle nos sistemas de produção de petróleo (risers, poços) apresenta várias vantagens: (i) permite operar poços com taxas de produção mais altas ao mitigar ou suprimir as oscilações da vazão, (ii) diminuir a fadiga do riser e (iii) simplificar o controle do sistema de produção primário. Claramente o controle ativo de poços e risers substituindo ao controle reativo, atualmente em uso, representa um ponto de inflexão na automação dos sistemas de produção. Neste sentido, a empresa PETROBRAS tem previsto automatizar, aplicando o algoritmo de controle

apresentado neste trabalho, mais plataformas de produção de petróleo durante os próximos anos.

## Referências Bibliográficas

- [1] Fabio C. Diehl *et al.* 10% increase in oil production through a field applied APC in a Petrobras ultra-deepwater well. *Control Engineering Practice* 91 (2019), 104108.
- [2] Plucenio, A., Ganzaroli, C.A., and Pagano, D.J. Stabilizing gas lift well dynamics with free operating point. *Proc. of IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production*, pp. 95-100. Norway, 2012.
- [3] Stasiak, M. E., Pagano, D. J., Plucenio, A. A New Discrete Slug-Flow Controller for Production Pipeline Risers. *Proc. of IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production*. Norway, 2012.
- [4] Plucenio, A., Campos, M., Teixeira, A. New Developments in the Control of Fluid Dynamics of wells and risers in oil production systems. *IFAC-PapersOnLine* 48-6 (2015), pp. 97-103.
- [5] Meglio, F.D., Kaasa, G.O., and Petit, N. A first principle model for multiphase slugging flow in vertical risers. *48th IEEE CDC* (2009).

## Breve biografia do Professor Agostinho Plucenio (falecido em 2017)



Agostinho se formou em Engenharia Elétrica na UFSC em 1981, com um dos mais altos índices IAA de todos os tempos da UFSC, e depois de muitos anos trabalhando na indústria do petróleo, com longa experiência na empresa Schlumberger, voltou à UFSC para fazer o mestrado em Engenharia Elétrica (2003) e o doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas (2010). Depois do doutorado participou em vários projetos de pesquisa junto ao Programa de Formação de Recursos Humanos PRH34 na UFSC, financiado com recursos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Foi Pesquisador visitante e Professor voluntário deste programa.

Também foi orientador de vários estudantes de graduação e mestrado e professor voluntário da UFSC. Fez inúmeras contribuições nas áreas de modelagem e controle, instrumentação e aplicações de controle e automação na produção e refino de petróleo e gás. Com especial destaque para o desenvolvimento do algoritmo de controle de golfadas apresentado neste artigo que opera atualmente em um poço de águas profundas (1850m de lâmina de água) conectado a uma plataforma na bacia de Campos.

Foi o principal mentor da criação do Laboratório de Campos Inteligentes (LACI) e do Instituto do Petróleo (InPetro) na UFSC, ambos localizados no Sapiens Park no norte da Ilha. Sua participação na criação e viabilização do Laboratório Experimental de Escoamento Multifásico (LEEM) foi fundamental e por isso a escolha desse laboratório para levar seu nome. Nos últimos anos foi CEO da Firenze Consultoria em Engenharia e Informática Ltda. e professor voluntário no Departamento de Automação e Sistemas da UFSC. Ao longo da sua carreira atuou principalmente nos seguintes temas: modelagem e controle de sistemas lineares e não lineares, controle preditivo, controle preditivo distribuído, instrumentação e aplicações de controle e automação na produção e refino de petróleo e gás.

O reconhecimento final dos autores ao prof. Agostinho Plucenio precursor da pesquisa e principal responsável pela atuação do DAS na área de Petróleo e Gás. Os autores deste artigo, que colaboraram com ele durante muitos anos, lamentamos profundamente sua irreparável perda e continuamos com seu legado. ■

# Estabilização da Vazão Exportada pelas Estações Coletoras no Campo Terrestre de Canto do Amaro

**Autores:** Marcelo Lopes de Lima, Luis Miyatake, Mário C. M. de Campos, Raphael Cota, Eduardo Camponogara, Antônio Cabral Junior, José Figueiredo de S. Neto, Vicente Delgado Moreira

A produção de petróleo em campos terrestres nos remete aos icônicos “cavalos de pau” avisados das estradas que cortam campo de produção (ver Fig. 1) e responsáveis pela produção dos poços. Esses poços alimentam esta-



Fig. 1: Unidade de bombeio mecânico, típico de campos onshore.

ções coletoras (EC) distribuídas pela área geográfica do campo e que, através de um conjunto de bombas e dutos, exportam o fluido acumulado para uma estação central (ECC), onde esse fluido será processado.

As estações coletoras são compostas por

tanques de produção e por um conjunto de bombas que transferem a produção para a estação central como mostrado na Fig. 2. No caso de Canto do Amaro, parte das bombas possuem motor com variador de velocidade, o que permite operá-las com rotação variável. O restante das bombas seguem um algoritmo ligadesliga que, sucessivamente, liga as bombas quando o nível atinge valores máximos sucessivos, e desliga as bombas quando o nível atinge valores mínimos sucessivos. Dependendo da razão de produção dos poços, uma ou mais bombas devem permanecer ligadas para manter o nível nos tanques dentro de limites de operação.

Observe que não há coordenação que

previna a partida ou parada de bombas de diferentes estações ao mesmo tempo (ou próximas no tempo). Quando muitas bombas são acionadas ao mesmo tempo, a pressão no sistema de exportação pode experimentar uma elevação brusca a ponto de causar o desarme das bombas. Também, se múltiplas bombas forem ligadas ao mesmo tempo, a oscilação no fluido que chega à estação central causa uma perturbação que dificulta o processo de separação. A minimização da oscilação da vazão de fluido recebido pela estação central é particularmente importante em campos maduros, onde a fração de água no fluido cresce sem o correspondente aumento no tempo de residência. Também importante é o fato de que a interface de água/óleo na estação central é controlada ma-



Fig. 2: Estação coletora (EC) - na foto é possível ver os tanques e as bombas de transferência para a estação central.

nualmente, no campo, pela atuação na válvula de drenagem de água. Nessa configuração, o fluxo de entrada deve ser o mais constante possível para evitar o constante ajuste da válvula de drenagem em campo.

Foi então proposto, em parceria com o Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES) um sistema que atua partindo e parando bombas nas estações coletoras de forma coordenada, de modo a evitar variações bruscas na vazão total entregue à estação coletora central, e que mantenha os níveis dos tanques dentro das respectivas faixas de controle. A aplicação foi desenvolvida para um campo de petróleo

terrestre maduro com mais de 1600 poços, espalhados por uma vasta área na região do Canto do Amaro. Os poços são servidos por 20 estações satélite distribuídas que coletam a produção dos poços próximos e bombeiam o fluido para uma estação central, onde o fluido é então tratado e exportado.

As principais ferramentas de software utilizadas nesse projeto para viabilizar a aplicação do escalonamento das bombas de Canto do Amaro são o MPA (Módulo de Procedimentos Automatizados), GAMS (General Algebraic Modeling System) e CPLEX (solver para otimização quadrática inteira-mista). O

MPA é utilizado para gerenciar a aplicação, implementar os requisitos operacionais, fazer o pré-processamento dos dados antes de chamar o otimizador, obter o resultado da otimização, fazer o pós-processamento dos resultados e interfacear com os sistemas de controle. O MPA faz, também, o gerenciamento dos controladores PID das bombas com variador de velocidade. O GAMS, por sua vez, modela o problema de otimização que deve lidar com variáveis contínuas (níveis) e variáveis inteiras (decisão de quais bombas ligar/desligar) resultando em um problema de programação quadrática inteira-mista, MIQP (Mixed Integer Quadratic Program), resolvido por um solver acoplado.

A Fig. 3 exemplifica o sistema completo. Para a supervisão do desempenho do sistema e de suas variáveis internas, o MPA escreve, também, em um historiador de uso geral (BR-H) que, por sua vez, disponibiliza gráficos para o usuário através de um visualizador (BR-V).

O sistema de controle e automação foi comissi-

onado para operar, em um primeiro momento, as 12 estações de satélite mais produtivas entre as 20 estações do campo petrolífero do Canto do Amaro. As outras 8 estações satélite serão agregadas ao sistema em uma segunda fase, pois aguardam o *retrofit* da rede de comunicação por rádio que troca dados entre as estações satélite e a sala de controle. A operação coordenada das estações satélite comissionadas contribuiu para estabilizar o funcionamento da rede coletora, como foi demonstrado com base na operação do campo.

Com a implantação do sistema, os resultados mostraram uma vazão consideravelmente mais estável, com uma redução de cerca de 26% nos acionamentos de bombas, além de uma redução na carga de trabalho dos operadores que passaram a intervir cerca de 56% a menos.

Maiores detalhes do problema de estabilização de vazão, metodologia de solução e resultados práticos podem ser encontrados em artigo técnico disponível pelo link: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.005>.

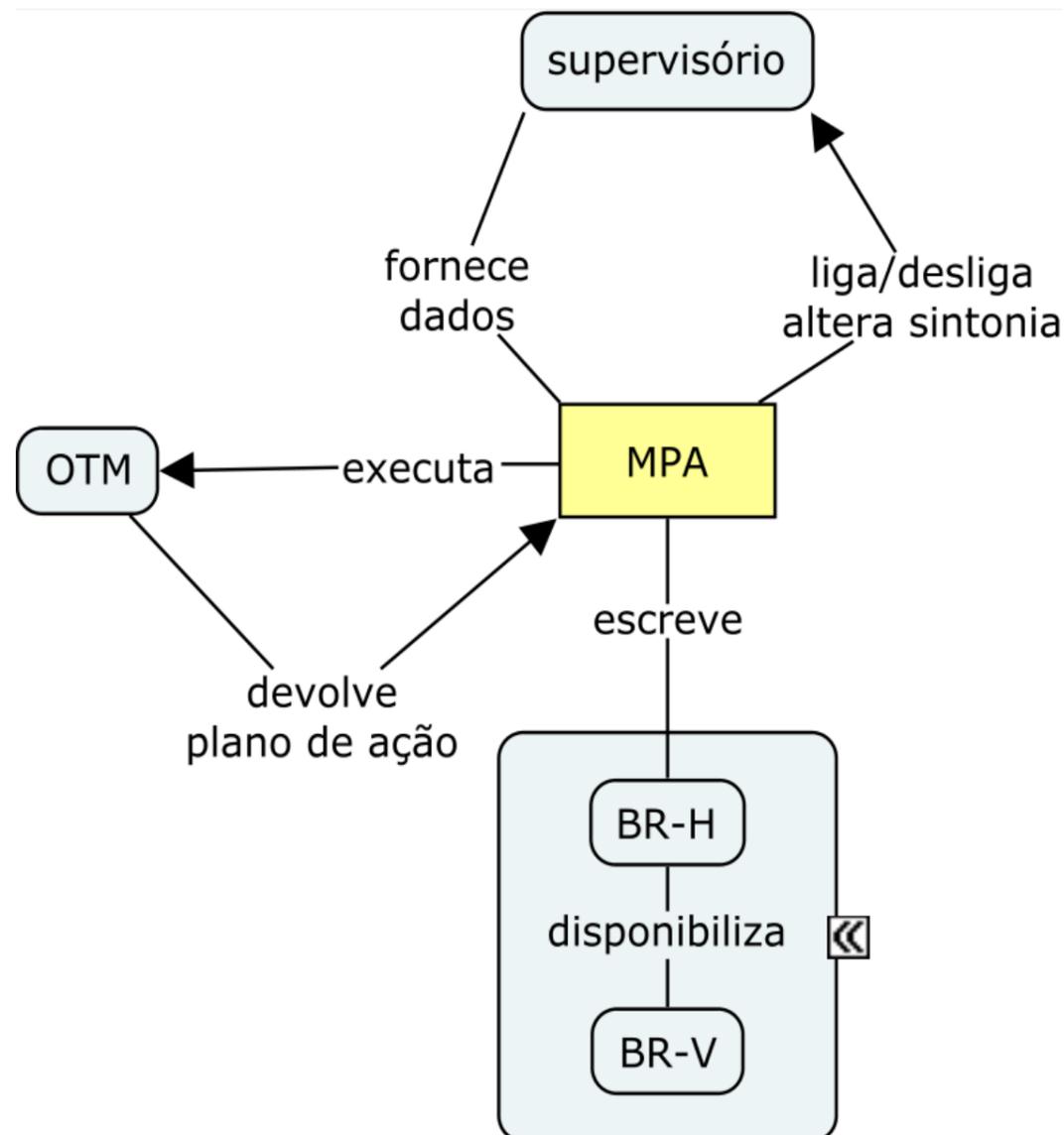


Fig.3: Sistema completo, composto pelo sistema de supervisão da planta (SCADA), pelo MPA, o módulo de otimização e os módulos de supervisão da aplicação (historiador e visualizador).

## Projeto AG-BR: Sistemas e Algoritmos de Controle Multiagentes

**Autores:** Cleber J. Amaral, Sérgio P. Bernardes, Mateus Conceição, Jomi F. Hübner, Luis P. A. Lampert, Marcelo Lopes de Lima, Otávio A. Matoso e Maicon R. Zатели

### I. Introdução

Recentemente diversos estudos têm sinalizado a emergência da quarta revolução industrial [9]. Os pesquisadores concordam que um conjunto de novas tecnologias está provocando sensíveis mudanças na cadeia produtiva, desde a aquisição de matéria-prima, logística e produção de bens até os serviços de entrega e pós-vendas. Dentre as tecnologias que supor-

tam esta revolução estão Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS), Big Data, Machine Learning, entre outras [4]. Para integrar e controlar todos estes processos e as diversas entidades relacionadas, tem-se aplicado o conceito de Sistemas Ciber-Físicos (CPS, do inglês Cyber-Physical Systems). O CPS integra os processos físicos e virtuais, traz uma abstração padronizada para as entidades e uma arquitetura de integração em um sentido amplo.

A abordagem de Sistemas MultiAgentes (SMA) tem sido utilizada como parte do CPS, virtualizando entidades, permitindo controle e interoperabilidade em muitas pesquisas [5, 6, 8]. De fato, em uma fábrica os diversos sensores, controladores, atuadores, softwares e outras entidades podem ser virtualizados de uma forma padronizada, permitindo que se conectem e interajam de uma forma fluída. Os agentes acrescentam inteligência a partir da informação virtualizada, tomam decisões e atuam nessas entidades digitais para que realizem ações no mundo físico. Além da virtualização e possibilidade de agregar inteligência aos processos, os SMA oferecem boas ferramentas (conceituais e de implementação) para o desenvolvimento de soluções em cenários complexos, dinâmicos e com informação e tomada de decisão descentralizados.

No projeto em parceria com a Petrobras (CENPES) investigamos a aplicação prática e possíveis vantagens e desvantagens de se utilizar SMA em cenários da indústria de petróleo e gás. Neste cenário, já se observa o sucesso da automação e o consequente aumento de eficiência em diversos processos. No entanto, os avanços não são tão notáveis em processos de elevada complexidade com alto dinamismo, incertezas, perturbações, falhas, interações entre muitos sistemas ou entre sistemas e humanos; que são características dos problemas nos quais a abordagem de SMA pode ser adequada.

A avaliação da abordagem de SMA tem um viés mais prático no projeto e portanto o framework de desenvolvimento JaCaMo [3] foi utilizado (<http://jacamo.sf.net>). Esse framework facilita o desenvolvimento de SMA utilizando diferentes abstrações de alto nível para agentes, ambientes e organizações. Na Petrobras, dois sistemas com potencial para

uma abordagem de agentes, ambiente e organização foram identificados:

**Heatric** (identificado como “Caso 1”): sistema já implementado para proteção dos trocadores de calor do tipo circuito impresso instalado em alguns FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*).

**BCSS/Gás Lift** (identificado como “Caso 2”): processo de ajuste de parâmetros dos controladores usados na elevação do petróleo dos poços por meio de Bombas Centrífugas Submersas Submarinas (BCSS) ou através de injeção de Gás Lift.

O Caso 1 investiga o melhor posicionamento e abrangência do framework JaCaMo na aplicação Heatric. As opções consideradas são: (i) JaCaMo como substituto da linguagem de implementação atual, com a implementação tendo lógica de programação também similar a implementação atual; (ii) JaCaMo como substituto da implementação atual, porém explorando os recursos do JaCaMo onde pertinente; e (iii) versão híbrida com JaCaMo e a linguagem atual, cada uma atuando onde se mostra mais adequada.

O Caso 2 investiga o potencial do JaCaMo como ferramenta de automação da *coordenação* das várias atividades envolvidas no processo de configuração dos controladores de BCSS ou Gás Lift. Antes de coordenar as atividades e os vários elementos atuantes nele (aplicativos, pessoas, ferramentas, ...), é necessário *integrá-los*. O Caso 2 inclui, portanto, um estudo de modelos e ferramentas de integração de agentes com os sistemas atuais e seus usuários.

## II. Caso 1: O lugar dos agentes

O Caso 1 se refere ao sistema que manipula a vazão de fluido refrigerante que circula pelos

trocadores de calor do FPSO. Em situações normais, a temperatura do gás é controlada por um dispositivo stand-alone, o *Controlador Indicador de Temperatura* (TIC). Porém, o TIC não confere proteção adequada em determinados transientes, fazendo-se necessário a atuação de um sistema programável atualmente desenvolvido no sistema MPA (Módulo de Processos Automatizados), que possui linguagem em blocos e interface própria para programação.

Para investigar a aplicação de SMA foram desenvolvidas três versões de protótipo. A primeira, fazendo uma tradução quase literal da lógica e forma de operação do sistema MPA atual para a linguagem do JaCaMo. Esta versão serviu principalmente para validar o uso de SMA como substituto direto do sistema atual. A segunda versão, também escrita em JaCaMo, propunha a aplicação de características dos agentes como reatividade e programação orientada a objetivos a fim de buscar oportu-

nidades de melhoria do processo.

Os melhores resultados foram obtidos na terceira versão, sendo um modelo híbrido conforme ilustrado na Fig. 1. Esta versão aproveita a estrutura atual e busca trazer as vantagens promovidas pelo SMA. O sistema atual desenvolvido em MPA é bastante robusto e possui amplo ferramental para desenvolvimento e monitoramento de plantas. Porém, fluxos muito extensos elevam muito a complexidade de implementação e manutenção. Neste ponto o SMA simplifica, pois pode atuar em uma camada de coordenação de fluxos do MPA mais reduzidos e simples. Além disso, quando integrado ao MPA, a característica relativa dos agentes possibilita reduzir o tempo de resposta a eventos, e a programação orientada a evento proporciona maior robustez ao sistema uma vez que possibilita o uso de múltiplos planos para atuar em resposta a determinadas demandas.

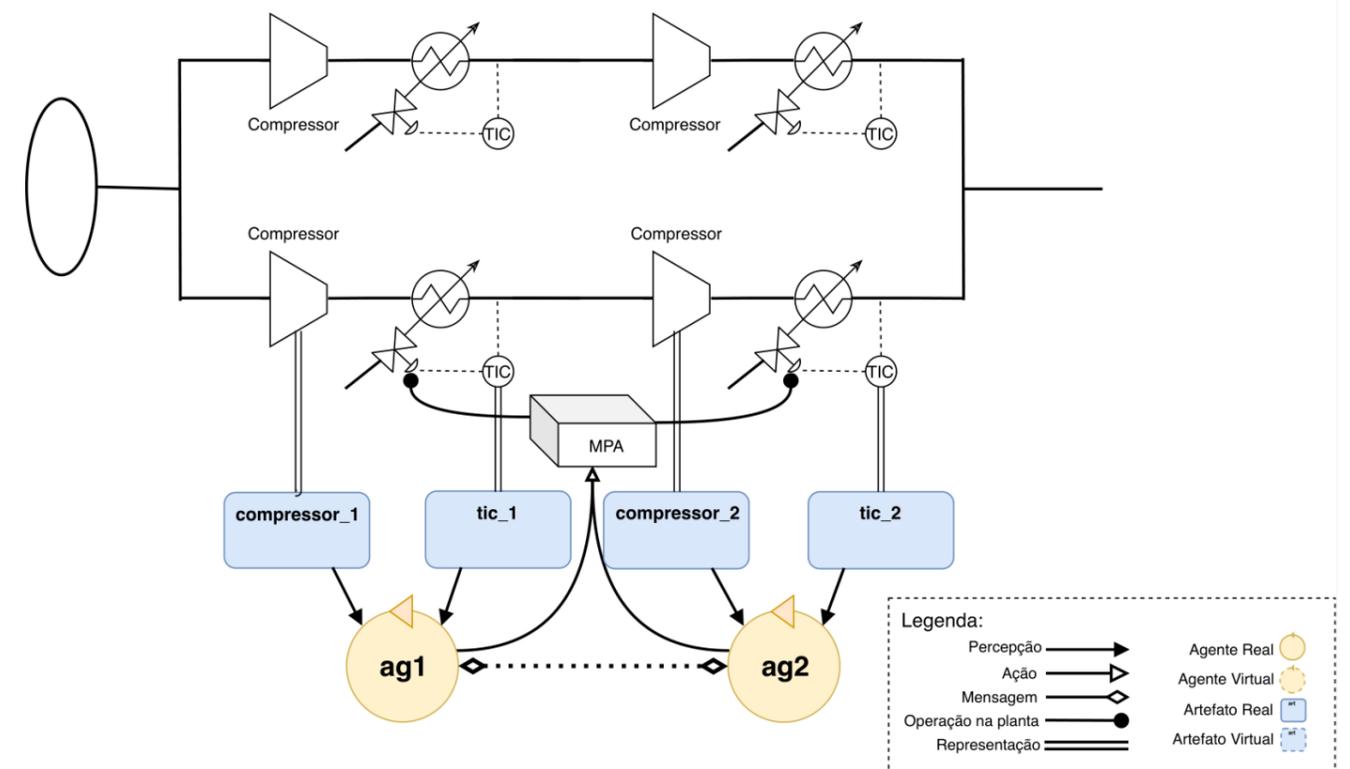


Fig. 1: Visão geral do processo de modelagem da versão híbrida MPA-JaCaMo para o sistema de compressão completo. Os compressores e TICs são modelados como artefatos no SMA e espelham os equipamentos da planta. Da mesma forma, o sistema de controle (MPA) é modelado como um artefato. Os agentes percebem e atuam na planta por meio destes artefatos.

### III. Caso 2: Coordenação e Integração

O Caso 2 apresenta um cenário que envolve a integração de quatro softwares e três agentes humanos: um engenheiro, um operador de campo e um agente que representa uma organização externa (A Agência Nacional de Petróleo - ANP). Atualmente, o engenheiro é responsável por coordenar as atividades capturando dados de um software para aplicar em outros, além de realizar trabalho intelectual de verificar os dados gerados para validar comandos que na prática representam mudanças na planta quanto à compensações do sistema que visam controlar a vazão do petróleo que está sendo elevado de um poço. Entendendo que o engenheiro já é bastante sobrecarregado, como requisito é solicitado que seja investigada a possibilidade de reduzir a carga de atividades do engenheiro, possivelmente integrando processos de forma autônoma e atuando de forma a apoiar o engenheiro nas validações. Ao contrário do Caso 1, este pode ser visto como um desafio do ponto de vista macro-sistêmico já que é principalmente um problema de coordenação, integração e de tomada de decisão.

Na investigação dividimos o problema de integração em dois: integração software com software; e integração entre software e humanos. Na integração entre softwares, realizamos testes com as ferramentas Apache Camel, Node-RED e implementamos uma API para o JaCaMo. No caso do Apache Camel, foram implementados componentes de integração que permitem que agentes ajam como clientes, consumindo serviços providos por outros sistemas. No caso do Node-RED, adotamos a visão de camadas deixando as questões de integração isoladas tanto dos agentes como dos demais softwares. Na implementação da

API, desenvolvemos um projeto chamado JaCaMo-REST [1] que provê *endpoints* para que o SMA seja visto como um servidor onde agentes podem ser consultados. Por fim, na integração entre software e humanos estudamos *chatbots* e prototipamos agentes integrados às ferramentas Telegram e Microsoft Teams, utilizando a abordagem *Pattern Matching* para definição de diálogos.

Em nossa abordagem, propomos que a utilização de agentes pode ser aplicada para dar mais segurança aos processos e também pode reduzir a quantidade de tarefas que atualmente precisam ser realizadas pelos colaboradores. O SMA foi aplicado para *coordenar* o fluxo de atividades fazendo uso das facilidades promovidas pela ferramenta de *integração*. Nos agentes foram desenvolvidas funcionalidades que aproveitam características dos agentes como proatividade e reatividade, fazendo com que perseguissem o objetivo de cumprir o ciclo que envolve as diversas trocas de dados entre sistemas e humanos, tarefa de certa forma repetitiva que ficava a encargo do engenheiro. Importante destacar que mantivemos os processos críticos de controle, incluindo a atuação em tempo real, sendo realizados pelos tradicionais dispositivos de controle e aos humanos competem as tarefas de validação das sugestões geradas pelos agentes. A Fig. 2 apresenta a visão do caso utilizando SMA.

### IV. Conclusões

O desenvolvimento de duas aplicações nos permite concluir que a abordagem SMA traz *flexibilidade* ao sistema por facilitar a divisão de atividades para diferentes agentes que acabam funcionando como módulos autônomos do sistema [7]. O aparato organizacional do JaCaMo permite que as atividades de uma aplica-

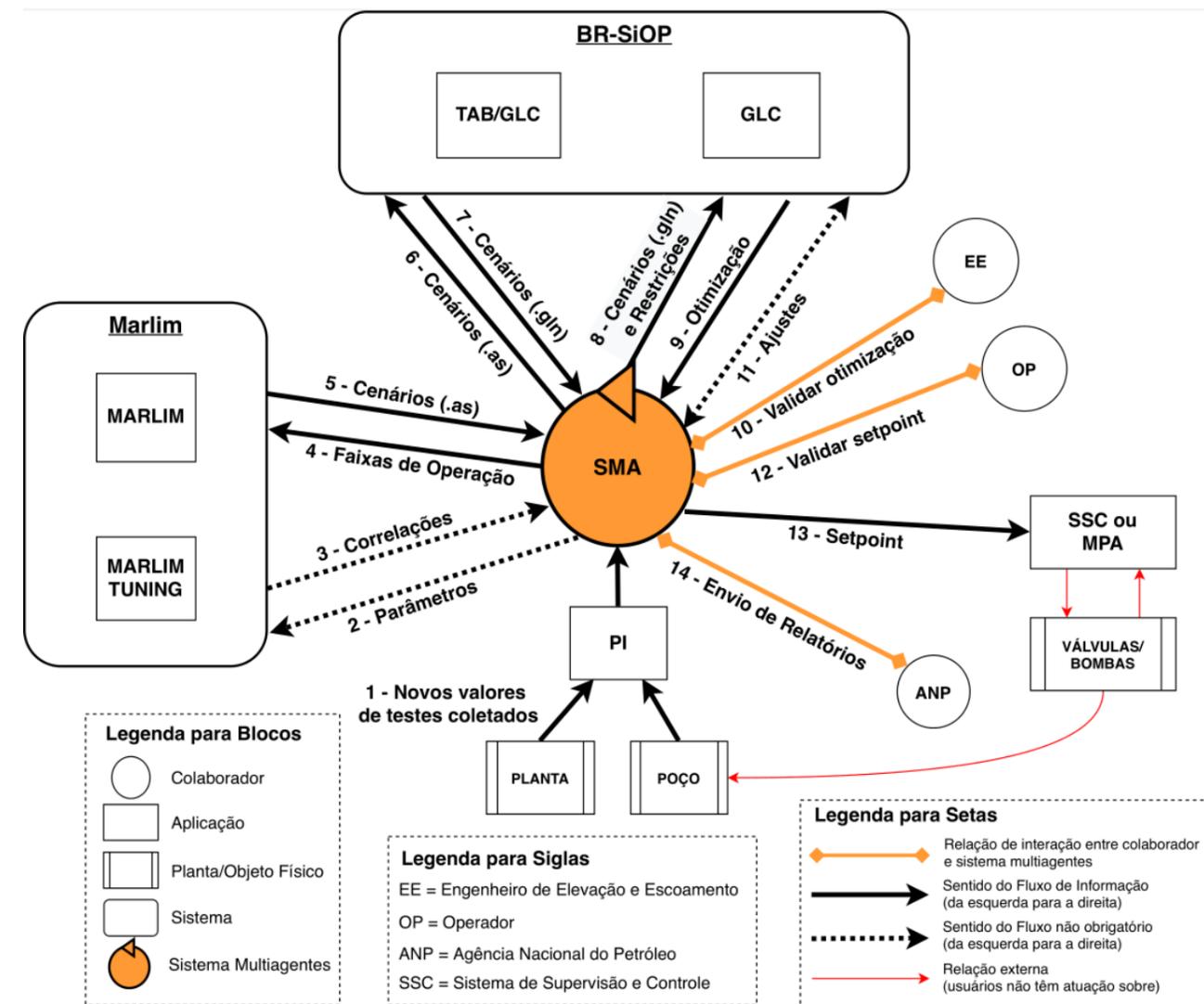


Fig. 2: Visão do processo utilizando a abordagem de agentes, destacando os vários sistemas que foram integrados e são coordenados pelo SMA.

ção sejam organizadas e *coordenadas* por uma estrutura central que viabiliza rápidas trocas na sequência de atividades. Adicionalmente, os agentes possuem conjuntos de planos para o cumprimento de objetivos. Isso pode elevar sensivelmente a robustez de um sistema, pois o agente pode dispor de uma série de opções de solução (planos) para realizar determinado objetivo. Esta característica é ainda potencializada com o uso de uma plataforma SMA de código interpretado como o JaCaMo que permite *hot-swap* de agentes ou planos, o que facilita o aprimoramento contínuo do sistema. Finalmente, a partir das facilidades de *integração* [2], a abordagem de agentes permite construir uma camada que abstrai os sistemas e atores

envolvidos, facilitando tanto a inclusão quanto a alteração destes componentes. Por exemplo, a inclusão de ferramentas de aprendizado de máquina é simplificada quando encapsuladas em um agente. Da mesma forma, a inclusão de dispositivos de IoT é simplificada quando encapsulados em um artefato do ambiente. Uma vez encapsulados em agentes e artefatos, a construção de soluções com estes componentes pode fazer uso das vantagens de coordenação dos SMA.

### Referências

1. Cleber J. Amaral, Jomi F. Hübner, and Timotheus Kampik. Towards Jacamo REST: A resource-oriented abstraction for managing multi-agent systems. In *Anais do XIV Workshop-Escola de*

Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações (WESAAC 2020), 2020.

2. Cleber Jorge Amaral, Sérgio Pereira Bernardes, Mateus Conceição, Jomi Fred Hübner, Luis Pedro Arenhart Lampert, Otávio Arruda Matoso, and Maicon Rafael Zlatelli. Finding new routes for integrating multi-agent systems using apache camel. In Jerusa Marchi, Gleifer Vaz Alvez, and Gustavo Giménez-Lugo, editors, *Anais do XIII Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações*, pages 119–130, 2019.

3. Olivier Boissier, Rafael H. Bordini, Jomi Hübner, and Alessandro Ricci. *Multi Agent Oriented Programming: Programming Multi-Agent Systems Using JaCaMo*. MIT Press, 2020.

4. Chiara Cimini, Roberto Pinto, and Sergio Cavaleri. The business transformation towards smart manufacturing: a literature overview about reference models and research agenda. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1): 14952–14957, 2017.

5. S. Luis A. Cruz and B. Vogel-Heuser. Comparison of agent oriented software methodologies to

apply in cyber physical production systems. In *Proceedings - 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2017*, 2017.

6. Paulo Leitão, Stamatis Karnouskos, Luis Ribeiro, Jay Lee, Thomas Strasser, and Armando W. Colombo. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE*, 104(5): 1086–1101, 2016.

7. Otávio A. Matoso, Luis P. A. Lampert, Jomi F. Hübner, Mateus Conceição, Sérgio P. Bernardes, Cleber J. Amaral, Maicon R. Zlatelli, and Marcelo L. de Lima. Agent programming for industrial applications: Some advantages and drawbacks. In *Anais do XIV Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações (WESAAC 2020)*, 2020.

8. Michal Pěchouček and Vladimír Mařík. Industrial deployment of multi-agent technologies: Review and selected case studies. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 17(3): 397–431, 2008.

9. Andreja Rojko. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 11(5): 77, 2017.

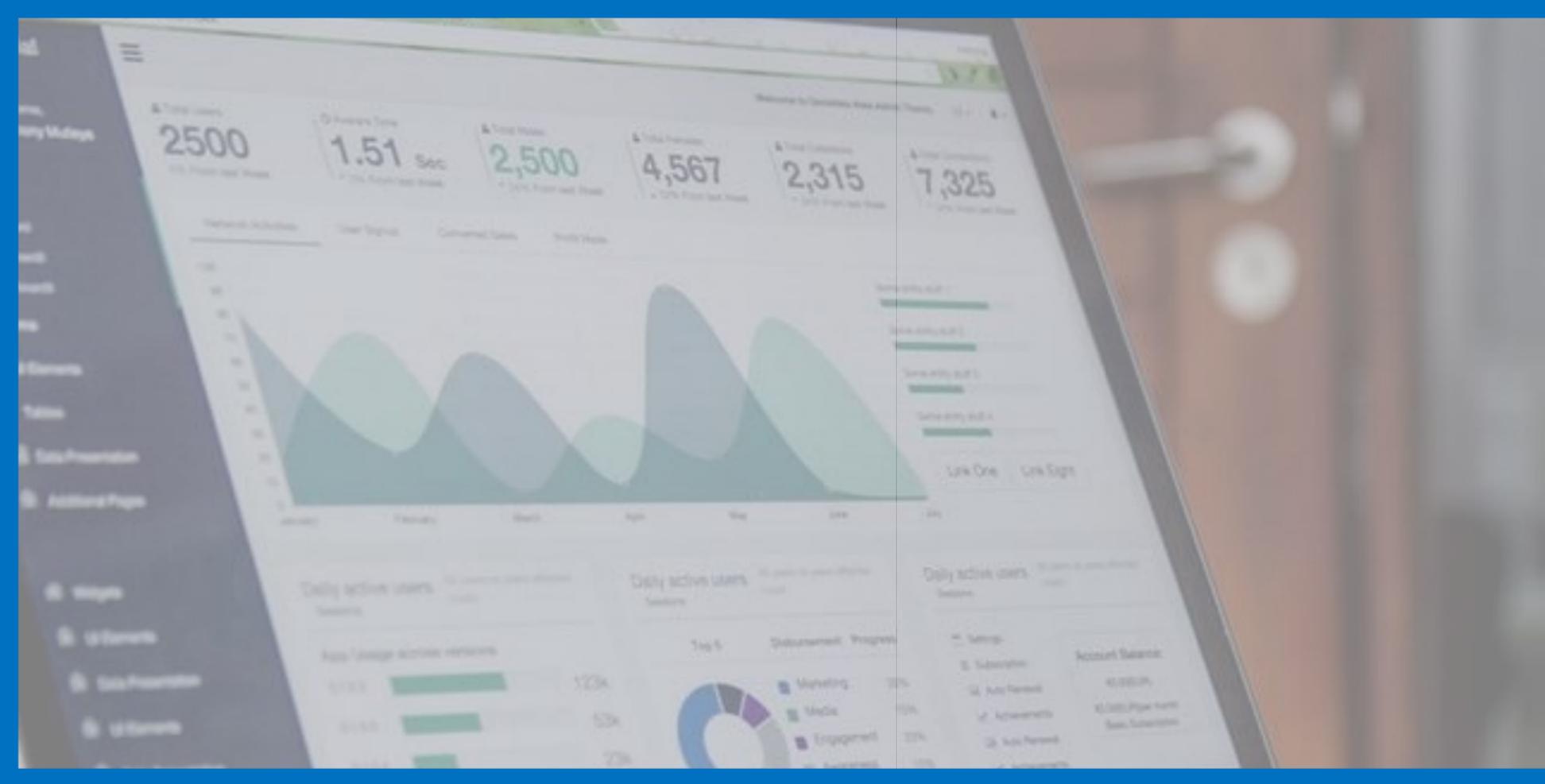


## Defesas de Doutorado

Título	Discente	Orientador
Improvement of Visual-Inertial ORB-SLAM using Correction in State Estimation	Seyed Jamalaldin Haddadi	Eugênio de Bona Castelan Neto
Test Generation for Shared-Memory Verification of Multicore Chips	Gabriel Arthur Gerber Andrade	Luiz Cláudio Villar dos Santos
Control of Classes of Linear Discrete-Time Parameter-Varying Systems under Input Constraints	Carla de Souza	Eugênio de Bona Castelan Neto
Controle Preditivo baseado em Modelo de Cômputo Rápido: contribuições em Algoritmos Embarcados com Otimização Online para Formulações Entrada-Saída	Vinícius Berndsen Peccin	Julio Elias Normey-Rico
Relay Selection Technique Applied to Wireless Sensor Network: the ORST Approach	Suelen Macedo Laurindo	Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes

## Defesas de Mestrado

Título	Discente	Orientador
Uma Arquitetura de Softbot-Inteligente-Como-Serviço para Análise Automática de Dados em Gerenciamento de Produção Remoto	Brunno Abner Machado	Ricardo José Rabelo
Diagnóstico Síncrono Descentralizado de Sistemas a Eventos Discretos Sujeito a Atrasos de Comunicação de Eventos	Guilherme Teixeira Araújo	Felipe Gomes de Oliveira Cabral
Análise do Gerenciamento de Veículos Automatizados com Exploração Livre da Área da Interseção	Georgios Joannis Ninos Neto	Rodrigo Castelan Carlson
Linear Relaxations of Bilinear Terms for the Operational Management of Crude Oil Supply	Leandro Pohlmann Rocha	Eduardo Camponogara
Controle Preditivo Baseado em Modelo aplicado a Sistemas de Aquecimento por Indução: um estudo de caso	Guilherme da Fonseca Pereira	Rodolfo Cesar Costa Flesch
Desenvolvimento de um Sistema de Contagem e Classificação de Veículos utilizando Redes Neurais Convolucionais	Jhon Jamilton Majin Erazo	Marcelo Ricardo Stemmer
Inspeção Automática de Defeitos em Ovos Comerciais usando Visão Computacional	Yessica Maria Valencia Lemos	Marcelo Ricardo Stemmer
Defense Methods for Convolutional Neural Networks Against Adversarial Attacks	João Gabriel Zago	Fábio Luis Baldissera
Análise de Tempo de Resposta de Tarefas no Sistema Operacional FreeRTOS	Bruno Dourado Miranda	Rômulo Silva de Oliveira
Geração de Mapas de Profundidade utilizando Redes Neurais Convolucionais	Juliano Emir Nunes Masson	Daniel Ferreira Coutinho
Controle de Tração em Aerogeradores com Asas Cabeadas	Marcos Thurow Schoenknecht	Marcelo de Lellis Costa de Oliveira
Development of an Optimal Control Strategy for Temperature Regulation and Thermal Storage Operation of a Solar Power Plants	Paulo Henrique Foganholo Biazetto	Gustavo Artur de Andrade
Representation, Classification and Regression Techniques applied to Legal Judgments about Immaterial Damage due to Failures in Air Transport Services	Thiago Raulino Dal Pont	Jomi Fred Hübner
Controle sob Restrições por Realimentação de Saída de Sistemas Lineares via Invariância Poliédrica e Otimização Bilinear	Geovana Aparecida França dos Santos	Eugênio de Bona Castelan Neto
Desenvolvimento de Sistema de Navegação Autônomo com Exploração de Fronteira	Marcelo Eugenio Manfrin Mafalda	Marcelo Ricardo Stemmer
Emprego de Medição na Estimativa do Tempo de Execução no Pior Caso para Sistemas de Tempo Real	Jéssica Junia Santillo	Rômulo Silva de Oliveira
Fault Diagnosis of Discrete-Event Systems Modeled by a Class of Labeled Petri Nets	Ana Caroline Tondo Bona-fim	Felipe Gomes de Oliveira Cabral



## O PPGEAS NA AVALIAÇÃO QUADRIENAL DA CAPES

Você sabia que a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior - do Ministério da Educação (MEC) faz, a cada quatro anos, uma avaliação de todos os programas de pós-graduação do Brasil?

Conheça os números do PPGEAS que serão usados nessa avaliação!

Você sabia que a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior - do Ministério da Educação (MEC) faz, a cada quatro anos, uma avaliação de todos os programas de pós-graduação do Brasil? Trata-se, possivelmente, do maior esquema de avaliação de desempenho realizado no país, abrangendo todos os 4.650 programas registrados que são classificados em 49 áreas de avaliação diferentes. Todo esse processo é conduzido por docentes permanentes, desde coordenadores e sub-coordenadores das áreas de avaliação até consultores *ad hoc* nomeados pelas coordenações de área.

Ao final do processo, os programas recebem notas em escala de 2 a 7. Na base da escala estão os programas cuja continuidade não se recomenda; no topo, programas de excelência com destaque em todas as dimensões da avaliação, que envolvem a formação de pesquisadores, a produção de conhecimento científico, a transferência de conhecimento, a internacionalização e o impacto econômico e social em nível regional e nacional. Programas com notas 6 e 7 são reconhecidos como Programas de Excelência (PROEX) da CAPES, tendo autonomia financeira para a gestão dos recursos de capital e de custeio (exceto bolsas).

Nas avaliações trienais realizadas desde a criação do PPGEAS (2007 a 2009 e 2010 a 2012), o programa obteve nota 5, correspon-

dente à nota máxima para cursos novos e em consolidação. Já no quadriênio 2013 a 2016, o PPGEAS obteve a promoção para a nota 6, consolidando-se como um PROEX. O quadriênio atual de avaliação compreende os anos de 2017 a 2020.

Neste artigo, são sintetizados os principais indicadores do programa organizados nas cinco dimensões da avaliação.

### 1. Formação de mestres e doutores

Os dados de 2017 a 2020 mostram que o PPGEAS formou 91 mestres e 38 doutores no período, conforme a fig. 1, onde apresentam-se os números de formação distribuídos pelas quatro linhas de pesquisa do programa.

A sobreposição de atuação nas linhas de pesquisa do programa é mais intensa nos casos das linhas de Controle e Automação para a Indústria de Petróleo e Gás (CAIPG) e Controle (6 docentes com atuação em ambas). Professores da linha de Sistemas Computacionais contribuem tanto na linha de Petróleo e Gás (3) quanto de Automação (3).

Com relação aos trabalhos de pesquisa em andamento, a distribuição entre as linhas de pesquisa apresenta os números mostrados na fig. 2. Observa-se, neste caso, maior equilíbrio na distribuição de trabalhos de mestrado do que de doutorado, porém com distribuição razoavelmente equilibrada entre as linhas.

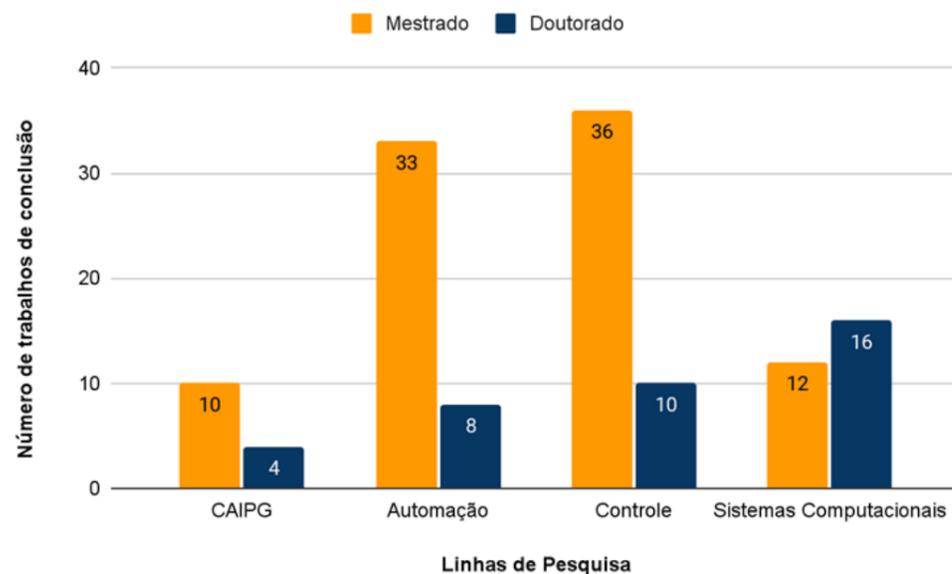


Fig. 1: Gráfico dos trabalhos de conclusão de mestrado e doutorado nas linhas de pesquisa do PPGEAS. Fonte: dados obtidos através do Sistema de Controle Acadêmico da Pós-graduação (CAPG) da UFSC.

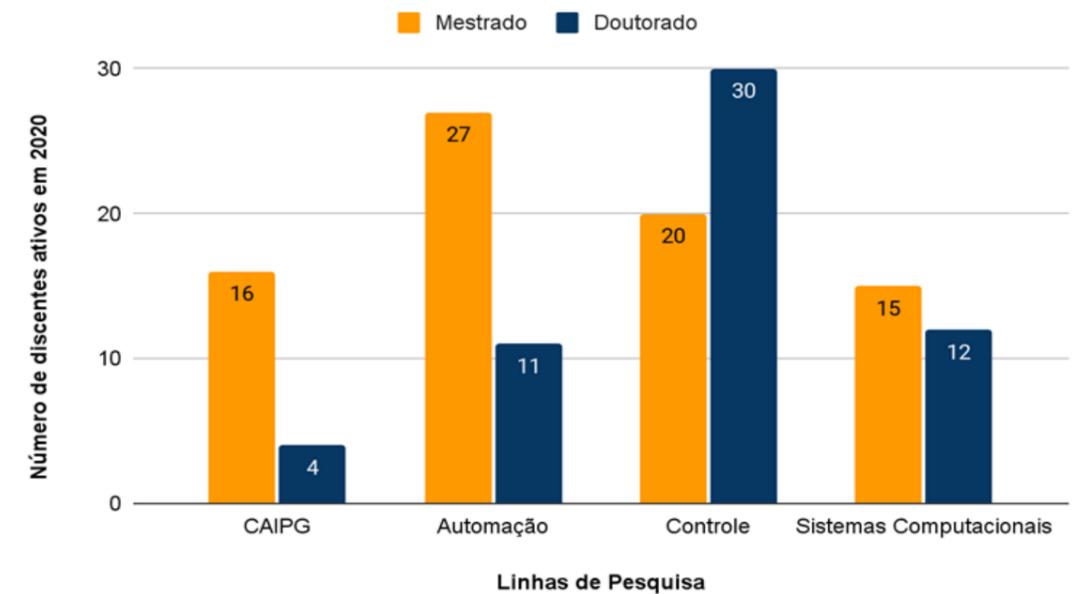


Fig. 2: Discentes cursando mestrado ou doutorado no ano de 2020. Fonte: dados obtidos através do Sistema de Controle Acadêmico da Pós-graduação (CAPG).

O levantamento realizado junto aos docentes do programa revelou, em relação a todos os egressos desde 2008, o papel preponderante do doutorado como etapa de formação para a carreira acadêmica (conforme fig. 3). Quanto ao mestrado, o número relevante de egressos que permaneceram no PPGEAS para realizar o doutorado (conforme fig. 4) indica a qualidade da experiência de formação vivenciada pelos mestrandos.

### 2. Produção científica do PPGEAS

Embora a produção científica do PPGEAS seja realizada com forte participação discente, apresenta-se, para facilidade de visualização, um quadro-resumo com os dados dos docen-

tes permanentes que atuaram no quadriênio de avaliação. A tabela 1 separa os docentes por linha de pesquisa principal de atuação (Automação e Sistemas Mecatrônicos, Controle e Sistemas Computacionais), ordenando pelo número de citações de todos os artigos publicados.

As publicações de artigos científicos em periódicos constituem um dos principais indicadores de avaliação pela CAPES. Em termos quantitativos, o número de artigos publicados pelos discentes e docentes do PPGEAS teve a seguinte distribuição anual: 45 (2017), 43 (2018), 45 (2019) e 62 (2020), com um total de 195 trabalhos publicados.

### 3. Impacto científico, econômico e social

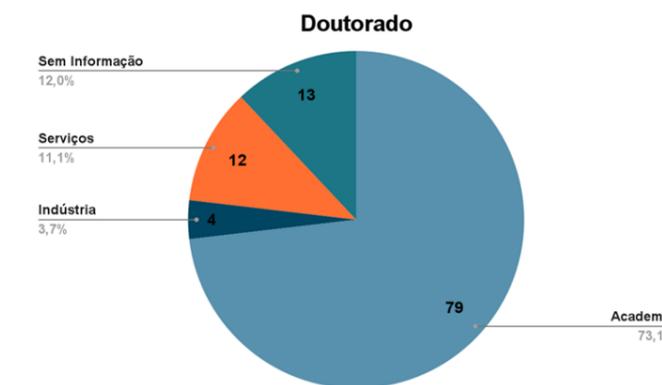


Fig. 3: Destino dos egressos do PPGEAS em nível de doutorado. Fonte: dados obtidos através de pesquisa realizada pela Coordenação junto aos Docentes Permanentes do PPGEAS.

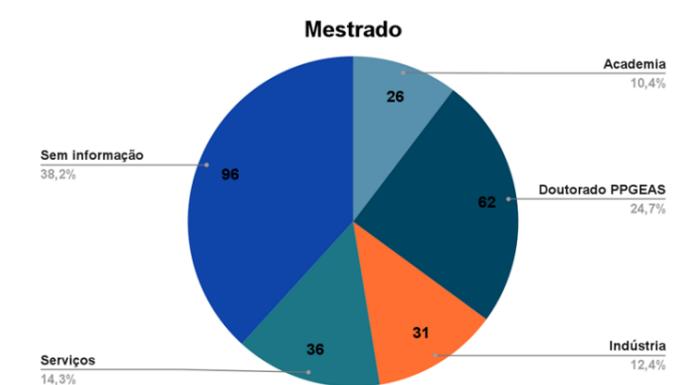


Fig. 4: Destino dos egressos do PPGEAS em nível de mestrado. Fonte: dados obtidos através de pesquisa realizada pela Coordenação junto aos Docentes Permanentes do PPGEAS.

## do programa

Para avaliar o impacto e o caráter inovador da produção científica do programa, apresentam-se os fatores de impacto (FI) geral e médio dos periódicos nos quais foram publicados os artigos científicos do quadriênio. Com base em pesquisa realizada na plataforma Google Scholar, obtiveram-se os números seguintes:

- FI geral do programa: 213,41;
- FI médio por docente permanente: 10,0.

Observa-se que, pelo indicador adotado pela CAPES, o PPGEAS apresenta alto fator de impacto médio, uma vez que valores acima de 5,0 caracterizam publicação de alto impacto.

Para a avaliação do impacto econômico, emprega-se o indicador das colaborações com instituições não acadêmicas. Nesse aspecto, o resumo das informações do quadriênio está disposto na fig. 5.

Por último, destaca-se ainda a elaboração do texto-base da Estratégia Nacional da Indústria 4.0; a despeito de várias iniciativas governamentais e empresariais voltadas para a adoção de tecnologias 4.0 pela indústria nacional, não existe uma estratégia nacional para o tema que ajude o país na definição e priorização de políticas públicas sobre o assunto. O prof. Ricardo Rabelo foi selecionado nacionalmente pelo Ministério da Economia para compilar estudos nacionais e internacionais sobre o assunto e elaborar um texto-base para a Estratégia Nacional da Indústria 4.0. Um docu-

mento de 108 páginas foi entregue em novembro de 2020, com análises e eixos de ações para um horizonte de 10 anos.

## 4. Internacionalização do PPGEAS

A dimensão de internacionalização indica, além dos critérios de publicações da avaliação da CAPES, a capacidade do programa em realizar pesquisas colaborativas com grupos de pesquisa de relevância mundial. As atividades do PPGEAS, neste particular, demonstram tal capacidade, destacando-se, entre outros, a liderança do programa no “Programa de Internacionalização” (PrInt) da CAPES.

O projeto do PPGEAS no âmbito do PrInt intitula-se “Automação 4.0 - Automação, Controle e Sistemas Computacionais para a Indústria e Serviços 4.0”. Objetiva-se apoiar e ampliar a visibilidade internacional do PPGEAS e demais programas participantes (PGEEL e PGCC), consolidando-os como referências no tema de tecnologias avançadas para os setores produtivos. As ações para internacionalização compreendem dois eixos complementares: i) o ensino e formação de Pós-graduação, e ii) a pesquisa científica e tecnológica. Os objetivos específicos do projeto consistem no desenvolvimento de novas técnicas, ferramentas e dispositivos computacionais e eletrônicos (software e hardware) adaptados à Indústria e Serviços 4.0. O valor global do projeto é de R\$ 2,4 milhões para cinco anos (2019 - 2023).

Docente	Linha de Pesquisa	Citações			h-index	
		Publ.	Total	2016+	Total	2016+
Eduardo Camponogara	Aut. Sist. Mecatrônicos	201	3515	1565	23	20
José Eduardo R. Cury	Aut. Sist. Mecatrônicos	173	2476	673	25	16
Rodrigo C. Carlson	Aut. Sist. Mecatrônicos	68	1197	751	12	11
Edson R. de Pieri	Aut. Sist. Mecatrônicos	173	1181	557	17	9
Max Hering de Queiroz	Aut. Sist. Mecatrônicos	62	1158	402	16	10
Werner Kraus Jr.	Aut. Sist. Mecatrônicos	82	566	316	13	10
Marcelo R. Stemmer	Aut. Sist. Mecatrônicos	127	404	193	11	8
Julio E. Normey Rico	Controle	325	5440	2964	37	27
Alexandre Trofino	Controle	129	3013	954	25	16
Daniel F. Coutinho	Controle	219	2119	1036	20	15
Eugênio Castelan	Controle	176	1728	669	20	12
Daniel J. Pagano	Controle	135	1342	925	19	15
Rodolfo C. C. Flesch	Controle	91	544	454	13	12
Ubirajara F. Moreno	Controle	111	506	273	11	8
Nestor Roqueiro	Controle	41	170	59	6	5
Jomi Fred Hübnér	Sist. Computacionais	273	6116	1937	30	14
Ricardo José Rabelo	Sist. Computacionais	212	2098	517	25	11
Leandro Buss Becker	Sist. Computacionais	191	1588	699	19	12
Carlos B. Montez	Sist. Computacionais	188	1540	626	17	12
Joni da Silva Fraga	Sist. Computacionais	139	1480	294	20	9
Rômulo S. Oliveira	Sist. Computacionais	237	1224	592	15	11
Jean-Marie Farines	Sist. Computacionais	146	1035	272	17	9

Tabela. 1: Produções dos docentes permanentes do quadriênio 2017-2020 do PPGEAS, com total da carreira e fator de impacto medido pelo número de citações e pelo índice-h.

Os demais dados da atuação internacional do PPGEAS podem ser resumidos conforme segue:

- Missões no exterior para formação (6 meses ou mais): 7 docentes;
- Participação em corpo editorial de periódicos científicos: 10 periódicos;
- Revisão de artigos científicos em periódicos internacionais: 230 revisões;
- Organização de eventos científicos: 4 eventos;
- Colaborações internacionais diversas: 8 bancas de doutoramento, 6 bancas de qualificação, 3 disciplinas ministradas, 10 visitas técnicas, 1 banca de seleção de docente;
- Intercâmbios e convênios de cooperação: 4 cotutelas de doutorado, 8 intercâmbios estudantis, 4 projetos de intercâmbio;
- Docentes convidados como palestrante em sessões plenárias de congressos internacionais: 8 participações;
- 88 artigos em periódicos e 36 em congressos com coautoria internacional;
- Participações em comitês e diretorias de organizações científicas internacionais: 3 docentes em comitês técnicos do IFAC, 1 docente em força-tarefa do IFAC.

## 5. Transferência de conhecimentos ao setor produtivo

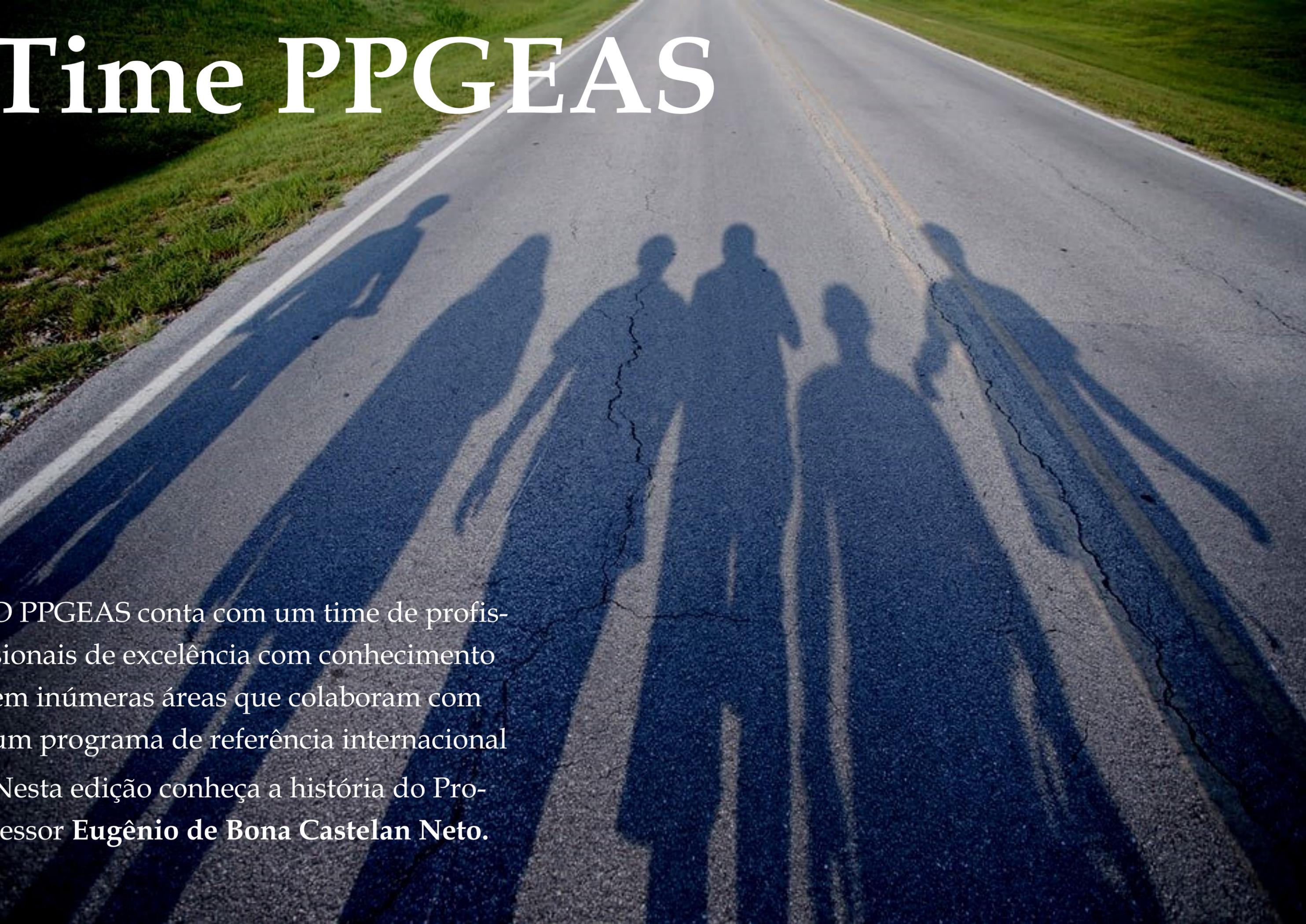
Como termômetro da capacidade do programa em gerar e transferir conhecimento ao setor produtivo, destacam-se os convênios executados com empresas e organizações fora do âmbito acadêmico. As principais ações do PPGEAS nesse âmbito foram 4 convênios com a empresa Petrobrás coordenados por docentes do programa; 2 convênios com a mesma empresa com participação de docentes; e 2 convênios com empresas do Estado de Santa Catarina.

Os principais recursos e resultados trazidos pelos convênios podem ser assim resumidos: 3 protótipos de sistemas aplicados na indústria; 1 software registrado com propriedade intelectual para a UFSC e Petrobrás; 1 empresa spin-off gerada; diversas bolsas para pesquisadores formados e em formação (8 bolsas de pós-doutorado, 5 bolsas de doutorado, 18 bolsas de mestrado, 35 bolsas de graduação); e diversos trabalhos de conclusão de mestrado e de doutorado defendidos no contexto dos temas pesquisados nos convênios.

Número de projetos/convênios coordenados por docentes do PPGEAS	6	Valor total: R\$ 9.377.412,73.	
Número de projetos/convênios coordenados por docentes externos ao programa com participação de discentes e docentes do PPGEAS	2	Valor total: R\$ 3.815.434,60.	
Registros de softwares junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI)	1 (CEMStudio).		
Desenvolvimento de protótipos aplicados ao ensino, pesquisa e extensão	UFSC - Config, ScoPlot, Editor IHM		
Implantação de sistemas de controle e aperfeiçoamentos em Processos Industriais com participação de discentes dos PPGs, aplicação no Brasil e exterior	Petrobras: 3 (BR-SiOP, Vertesis e MPA).	Plasson: 1.	Nidec: 1.
Bolsas disponibilizadas por indústrias a discentes do PPGEAS	Mestrado: 17	Doutorado: 5	Pós-doutorado: 8
Processos de P&D com participação de discentes do PPGEAS	Petrobrás: 6	Plasson: 1	Nidec: 2
Total aproximado de discentes envolvidos no Processos de P&D	30		
Empresas startups criadas como spin-offs dos projetos	Vertesis, 2019.		

Fig. 5: Resumo das informações do quadriênio do PPGEAS.

# Time PPGEAS



O PPGEAS conta com um time de profissionais de excelência com conhecimento em inúmeras áreas que colaboram com um programa de referência internacional

Nesta edição conheça a história do Professor **Eugênio de Bona Castelan Neto**.

# Eugênio de Bona Castelan Neto

Nasci em Criciúma, Santa Catarina, em 14 de outubro de 1959. Sou o filho mais novo dentre os seis filhos (três mulheres e três homens) da família constituída por João de Bona Castelan, comerciante de autopeças, natural de Morro da Fumaça, e de Maria José Nunes Pires Castelan, professora, natural de Florianópolis, ambos já falecidos. Dos meus pais, o casal conhecido como Dona Zezé e Seu Joanim, guardo muitas lembranças e muitos ensinamentos repassados através de seus exemplos e princípios de vida, estes baseados no amor e respeito à vida, à família e ao próximo, na honestidade no trabalho e na vida em sociedade. Em especial, a atuação da mãe como educadora e a dedicação do pai à sua profissão transmitiram aos filhos a importância do empenho nos estudos e no trabalho, e o gosto pelas áreas de educação, técnicas e artes. Assim, dentre os meus dois irmãos, o mais velho, Walter, pai de duas filhas, formou-se em Engenharia Mecânica em Porto Alegre, foi professor da UFSC, obteve seu doutorado em Matemática no ITA em meados da década de 1970 e realizou estágio pós-doutoral nos Estados Unidos. O outro irmão, João, pai de dois filhos, é médico cirurgião, tem Mestrado em Ciências da

Saúde pela UNESC e, atualmente, coordena a Residência de Cirurgia Geral do Hospital São José de Criciúma. Dentre as três irmãs, muito cuidadosas comigo durante minha infância e sempre amorosas e companheiras ao longo da minha vida, as duas mais velhas, Maria de Lourdes e Maria Helena, ambas com "mãos de fada" para a costura e outras artes manuais, diplomaram-se como normalistas no Colégio Coração de Jesus de Florianópolis, habilitando-se, à época, para o ensino escolar. A primeira, conhecida como Lurdinha, mãe de cinco filhos, formou-se em Direito, está aposentada e vive em Criciúma onde conta com o carinho dos seus familiares. A segunda, minha madrinha de batismo, falecida em 1998, casou-se com Renato Carlson, professor aposentado do EEL/UFSC, e teve quatro filhos, um deles docente na UFSC e atual chefe do Departamento de Automação e Sistemas (DAS/UFSC), o professor Rodrigo Castelan Carlson. Minha terceira irmã, Maria Bernardete, carinhosamente chamada de Dete ou Detinha, é mãe de três filhos, mora aqui Florianópolis e é professora nos cursos de graduação e pós-graduação em Música da UDESC. Ela formou-se pianista na Instituto de Artes da UFRGS,

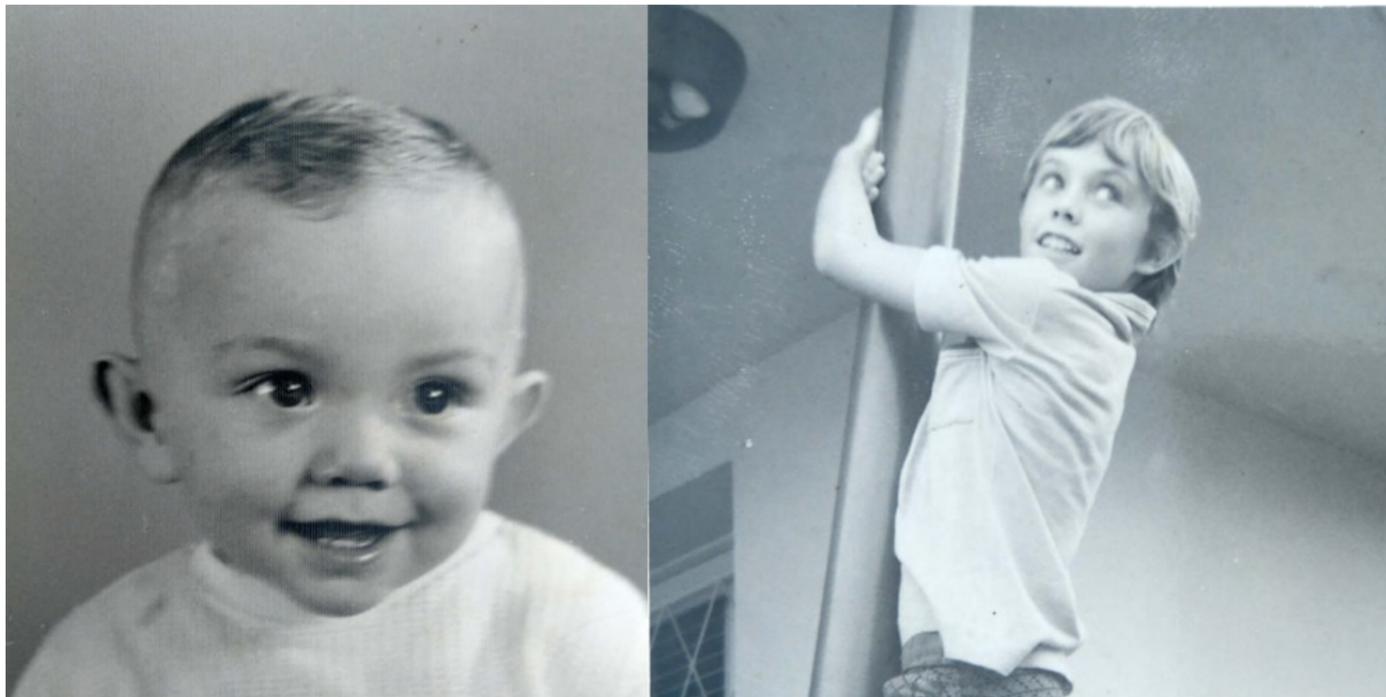


Fig. 1: Infância em Criciúma, Santa Catarina, na década de 1960.



Fig. 2: Sr. João (Joanim) e Dona Maria José (Zezé) e filhos (comigo no colo—Geno). Da esquerda para a direita: Maria Helena (Lene), Walter, Maria de Lourdes (Lurdinha), João e Maria Bernardete (Dete).

em Porto Alegre, onde também obteve seu Doutorado.

Vivi minha infância e juventude em Criciúma, então conhecida como a Capital Brasileira do Carvão, mais tarde também Capital do Azulejo, cidade com a qual continuo tendo ligações profundas, incluindo ser torcedor, desde criança, do Criciúma Esporte Clube, o Tigre Carvoeiro, única equipe catarinense campeã da Copa do Brasil de futebol. Cursei o Ensino Primário e o Ginásial, os quais constituem o Ensino Médio atual, em Criciúma. Em 1975, iniciei o Ensino Médio no curso científico do Instituto Estadual de Educação (IEE), em Florianópolis, e finalizei os últimos dois anos deste ciclo como aluno do Colégio de Aplicação da UFSC, tendo ingressado em cada uma das duas instituições após aprovação em exame de seleção para admissão. Já tinha como disciplinas preferidas a Matemática e a Física. Desta época, guardo ótimas lembranças, principalmente das novas amizades constituídas, dos professores dedicados e qualificados do Colégio de Aplicação e da vivência na Florianópolis de então, uma bela e receptiva cidade, ainda com ares de cidade interiorana. A Ilha de Santa Catarina sempre me

fascinou pelas suas belezas naturais, as quais eu ouvia minha mãe descrever e conhecia, em parte, pelas visitas e estadias que aqui realizávamos em família, desde minha infância. Como parte de meus parentes morava em Florianópolis, tinha a oportunidade de também conviver com meus tios e primos, assim como estar perto do irmão e das duas irmãs que na Ilha se estabeleceram e formaram suas famílias. Também, neste período, adquiri o gosto pelo surfe que, já naqueles anos, se implantara em Santa Catarina e, principalmente, na Capital.

Em 1978, após ter sido aprovado no vestibular da UFSC, iniciei o curso de Engenharia Elétrica, junto com outros seis colegas do Colégio de Aplicação. Com dois deles, Gonzalo Humeres Flores e Francisco Berka, formamos um grupo de estudo que se manteve durante todo o curso de graduação e também após nossa formatura, ao ingressarmos no Mestrado. Como estudante de graduação da UFSC, tive a oportunidade de conhecer pessoas de diversos locais e enriquecer o contato com outros grupos de pessoas. Além disso, tive aulas com professores com diferentes níveis técnicos, formas de transmitir o conhecimento e de comprometimento com o ensino e a academia. Também vivi os momentos intensos da política Universitária do final dos anos 1970 e início dos anos 1980, com movimentos estudantis e de professores que se fortaleciam e atuavam para um maior reconhecimento e valorização do Ensino Superior e da Universidades Pública, além de se posicionarem corajosamente pela redemocratização do País frente ao regime militar instaurado no Brasil desde o Golpe de 1964. Ainda nesse período, vi Florianópolis crescer e tornar-se uma cidade mais cosmopolita, praticava esportes como futebol e basquete, curti com frequência as praias de Florianópolis ou a Praia do Rincão, perto de Criciúma, onde eu veraneava com meus pais e familiares. Nos finais de semana, participava das festas e atividades noturnas aqui na Ilha ou em Criciúma. Durante alguns anos, também fui aluno da Escola de Música da UDESC, onde aprendi a tocar Flauta Transversal, participei do Coral e pude con-



Fig. 3: Formatura dos cursos do Centro Tecnológico (CTC) da UFSC em Janeiro de 1983 junto aos colegas da época do Colégio de Aplicação da UFSC. Da esquerda para a direita: Reinaldo, Celita, Prof. Marcelo Stemmer, eu, Francisco, Simone, Edson, Jackson e Gonzalo.

viver com o mundo da música clássica de Florianópolis junto com a irmã pianista Dete. Em 1980, no início do terceiro ano da graduação, nossa família viveu um momento de grande tristeza e que me marcou profundamente, o falecimento do meu irmão Walter no acidente aéreo ocorrido aqui em Florianópolis com uma aeronave da Transbrasil, no qual também faleceram outros professores da UFSC e pessoas da cidade.

Minha formatura como Engenheiro Eletricista deu-se em Fevereiro de 1983, após uma longa greve na UFSC que atrasara a finalização do último semestre do curso. No mês seguinte, ingressei no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PGEEL/UFSC) junto com um grupo de recém-formados do qual fazia parte, além dos colegas Gonzalo e Francisco, outro contemporâneo do Colégio de Aplicação e do

Curso de Engenharia Elétrica, o colega Marcelo Stemmer que, como eu, viria a tornar-se professor da UFSC. Após o primeiro trimestre de disciplinas, optei pela área de concentração em Sistemas de Controle para dar continuidade aos estudos e futuras pesquisas. Esta constituía minha área preferencial desde que, no final da graduação, vislumbrei realizar o mestrado para dedicar-me à vida acadêmica. A área de Sistemas de Controle estava ligada ao Laboratório de Controle e Micro-informática do Departamento de Engenharia Elétrica (LCMI/EEL), onde atuavam os professores Augusto Humberto Bruciapaglia, Jean-Marie Farines e Joni Fraga. Nesta época, a equipe do LCMI já buscava se fortalecer, dando nascimento, em 1990, ao curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação (ECA) e, mais tarde, ao Departamento de Automação e Sistemas (DAS) e ao Programa de



Fig. 4: Formatura em 1983, com os colegas do grupo de estudo Gonzalo Humeres-Flores e Francisco Berka. Junto com o Prof. Marcelo Stemmer, demos continuidade aos estudos no mestrado em Engenharia Elétrica na UFSC.

Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da UFSC (PPGEAS). Ainda no mestrado, novos grupos de estudo se estabeleceram, novas amizades se formaram e outras se fortaleceram e, principalmente, portas se abriram para novos conhecimentos em Sistemas de Controle e disciplinas relacionadas, num novo ambiente de estudo mais exigente e voltado à formação para a pesquisa. Durante o primeiro ano do Mestrado, cursei nove disciplinas, várias delas ministradas por professores que, futuramente, se tornariam colegas docentes no Departamento de Engenharia Elétrica (EEL) e, mais adiante, no DAS, como: Teoria de Sistemas Lineares, Sistemas Amostrados, Engenharia de Software, e Controle Multivariável e Identificação de Sistemas. Ainda durante a fase de disciplinas, conjuntamente com o colega Marcelo, fiz parte de um grupo de alunos que, liderados pelos professores Jean-Marie e Augusto, trabalhou no projeto e concepção de uma versão preliminar de um software que se tornou embrião do programa SAPIC (Sistema de Apoio Projeto Integrado de Controle) desenvolvido no

LCMI nos anos seguintes.

Em 1984, iniciei as pesquisas para o desenvolvimento de minha dissertação de Mestrado, sob a orientação do prof. Hamilton Silveira, pai do pequeno Hector, hoje professor do DAS. No segundo semestre daquele ano também atuei como professor substituto na disciplina de Princípios de Sistemas de Comunicação, ministrada para o curso de Engenharia Elétrica da UFSC. No 2º semestre de 1985, defendi minha dissertação intitulada "Dois Algoritmos de Identificação Paramétrica com Eliminação de Perturbação Determinística".



Fig. 5: Anúncio da defesa da minha tese de doutorado em 1992.

Logo a seguir, fui convidado para fazer parte da equipe do LCMI que desenvolvia a linha de pesquisa em Projeto Assistido por Computador para Sistemas de Controle, da qual faziam parte os professores Augusto e Jean-Marie, alunos de mestrado, bolsistas de graduação e engenheiros. Na equipe, atuei como Engenheiro-Pesquisador, com uma Bolsa de aperfeiçoamento do CNPq. Em conjunto com o professor da UFBA Adhemar Fontes, então mestrando no PGEEL, e sob orientação do prof. Augusto, trabalhei com a definição e implementação de algoritmos numericamente robustos para o posicionamento de pólos para sistemas lineares. O desenvolvimento desta tarefa foi uma oportunidade singular para solidificar alguns conhecimentos relativos à abordagem por variáveis de estado para o controle de sistemas multivariáveis. Fui nomeado co-orientador da dissertação do

“baiano” Adhemar e, também, participei da sua banca de Mestrado. Sedimentava-se, então, o meu gosto pela pesquisa e utilização de ferramentas matemáticas e computacionais em engenharia, em especial, a álgebra linear e suas aplicações em sistemas de controle.

Desde o final de mestrado, em 1986, eu morava no bairro Trindade, bem próximo ao Restaurante Frango e Fritas de então. Este era um dos vários “points” de Florianópolis que eu costumava frequentar junto com os amigos e amigas que tinha aqui na cidade, incluindo colegas da UFSC. Também continuava jogando basquete ou indo à praia com amigos e havia retomado a prática do surfe. Em 1987, conheci minha esposa, Eliane Lúcia Milanez, a Nane, natural de Caravágio, distrito de Nova Veneza, então enfermeira em um hospital de Criciúma. Casamos-nos um ano após, antes de partirmos para a França, onde realizei o

Doutorado como bolsista da CAPES, no contexto de uma Cooperação CAPES-COFECUB que envolvia pesquisadores do LCMI/EEL, no Brasil, e do LAAS (Laboratoire d’Automatique et d’Analyse des Systèmes, à época) em Toulouse, França. Cheguei na França em julho de 1988 para, inicialmente, fazer um estágio em língua Francesa na cidade de Compiègne, ao norte de Paris. Após a chegada da Nane, ao finalizar este estágio, partimos para Toulouse, a bela e acolhedora Ville-Rose situada no sudoeste da França. Estabelecemos residência no bairro de Rangueil, onde também se localizava o LAAS. Neste bairro também moravam alguns brasileiros com suas famílias, incluindo Vitorio Mazzola e Rosevelter da Costa, dois professores da UFSC, já meus conhecidos, que também realizaram seus doutoramentos no LAAS no contexto da Cooperação Bilateral já mencionado.

Iniciei as atividades no LAAS em setembro de 1988, para iniciar pesquisas relacionadas ao processamento paralelo aplicado a algoritmos de controle. Em março de 1989, recebi o DEA (Diplôme d’Etudes Approfondis), após defesa e aprovação do relatório de pesquisa intitulado “Programation Dynamique Distribuée sur Réseau Local de Stations UNIX”. Dessa forma, eu estava habilitado a desenvolver a tese de doutorado na área de Automatique. Optei, então, por dar continuidade ao doutorado num tema de pesquisa mais próximo da minha formação prévia e interesse pela teoria e aplicações de sistemas de controle. Assim, sob a orientação do Dr. Jean-Claude Hennet, pesquisador do CNRS, redirecionei-me para realizar a tese em tema relacionado ao controle sob restrições de sistemas multivariáveis objetivando utilizar, aprofundar e ampliar o uso do conceito de invariância-positiva de domínios poliedrais para análise e projeto de controladores na presença de restrições sobre as variáveis de estado e de controle. Em 22 de junho de 1992, praticamente 3 anos após o início das pesquisas em controle sob restrições, concluí meu doutoramento com a defesa e aprovação da tese intitulada “Sur l’Invariance Positive et la Commande sous Contraintes de Systèmes Linéaires Multi-

variables”. Durante esses anos no LAAS, pude construir e solidificar novos conhecimentos técnicos e científicos num ambiente de laboratório propício para o estudo e pesquisas de alto nível em Controle, Automação e Robótica, além de estabelecer laços científicos e de amizade duradouros com meu orientador, com outros pesquisadores e colegas doutorandos, em particular, com Pedro Peres, professor da Unicamp, e com Sophie Tarbouriech e Isabelle Queindec, hoje pesquisadoras CNRS no LAAS.

Nesse período de doutoramento, em conjunto com meu orientador, fui co-autor de dois artigos publicados nas revistas *Automatica* e *IEEE Transactions on Automatic Control* (TAC) e de um Capítulo de Livro. Além disso, publiquei um terceiro artigo de revista no *International Journal of Systems Science*, este em co-autoria com a colega Sophie, além de ter publicado e apresentado artigos em congressos internacionais realizados na França, Suíça e Inglaterra. No lado pessoal, durante este período de doutoramento, Nane e eu tivemos a oportunidade de conhecer a bela França e sua cultura, e visitar vários países da Europa, assim como conviver e construir novas amizades, inclusive, com famílias francesas com as quais mantemos laços desde então. No final de 1989, participei e fui aprovado em concurso para professor do Departamento de Engenharia Elétrica (EEL/UFSC) conjuntamente com os futuros colegas de profissão professores José Cury e Júlio Normey Rico. Na oportunidade, Nane e eu pudemos visitar familiares, votar no 2º turno da eleição presidencial e passar as festas de final de ano com nossas famílias. Posteriormente, recebemos alguns familiares em Toulouse e, durante um ano, compartilhamos a presença da família de minha irmã Maria Helena, cujo marido realizava um estágio pós-doutoral na cidade. Além disso, tive a alegria de contar com a presença do meu irmão João na defesa de minha tese de doutorado, pois, aproveitando o final da nossa estadia na França, ele realizou um estágio em cirurgia no Hospital Universitário de Toulouse.



Fig. 6: Eliane e eu com colegas franceses da época do doutorado em Toulouse. Da esquerda para a direita, Sophie, Isabelle, Jean-Paul e Geraldine.

De retorno ao Brasil em julho de 1992, Nane e eu voltamos a residir na Trindade, agora com a companhia de nossa filha Ana Flávia, nascida em Setembro. Em agosto de 1992, eu retomei minhas atividades de pesquisa em controle sob restrições no LCMI/EEL, inicialmente com bolsa de Recém-Doutor do CNPq. Em dezembro fui contratado como professor do EEL/UFSC para integrar-me ao grupo de professores responsáveis pelas disciplinas do Curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSC, implantado em 1990, sob a liderança dos agora colegas de profissão professores Augusto e Jean-Marie. Devido à contratação na UFSC, em função do ter um currículo considerado à época com número significativo de publicações em congressos e revistas internacionais, a bolsa de Recém-Doutor foi transformada pelo CNPq, para o biênio 1993-1994, em uma Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ), no Nível 2. Também tive as solicitações de renovação desta bolsa aprovadas e implementadas nos 4 biênios seguintes.

Em 1993, iniciei minhas atividades docentes na Graduação e também fui integrado ao corpo docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEEL). Em 1997 fixamos residência na

Praia do Campeche, local onde moramos até hoje. Nane e Ana exercem suas atividades ligadas ao *Patchwork* no Atelier Eliane Castelan, e eu continuo desfrutando do prazer de surfar, atualmente utilizando uma prancha de Stand-up Paddle. Ainda em 1997, fiz parte do grupo de professores que formou o atual Departamento de Automação e Sistemas (DAS), no qual exerci a chefia entre 2001 e 2002. Também participei da administração do DAS como sub-chefe em duas outras oportunidades, a mais recente na gestão do prof. Carlos Montez.

Em 2003, acompanhado pela esposa e filha, passei um Ano Sabático em Toulouse, agora como pesquisador visitante do LAAS e bolsista pós-doutoral da CAPES, para desenvolver pesquisas em conjunto com Sophie Tarbouriech e Germain Garcia no projeto "Controle e Detecção de Falhas em Sistemas Não Lineares sob Saturação". Em 2006 presidi a comissão encarregada pela proposta de criação de um Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PPGEAS) na UFSC. Além de mim, a comissão era composta por outros três professores do DAS (Jean-Marie, Edson De Pieri e Rômulo de Oliveira) e o prof. Raul Guenther da Engenharia Mecânica (EMC), um grande amigo,



Fig. 7: Em família com a filha Ana Flávia e esposa Eliane.



Fig. 8: Eu e amigos no *IFAC World Congress* em Toulouse, 2017. Da esquerda para a direita: Prof. Valter, Profa. Patrícia, eu, Prof. João Carlos e Profa. Lilian. Atualmente todos são membros da diretoria da Sociedade Brasileira de Automática (SBA).

professor e músico, que veio a falecer num acidente automobilístico. No final de 1996, após um processo que sofrera um primeiro revés na CAPES, o PPGEAS foi credenciado com Conceito 5 pela mesma Agência e iniciou suas atividades nos cursos de Mestrado e Doutorado já em março de 1997. Também fui o primeiro coordenador do PPGEAS entre 1997 e 2010. Nesse período, contei com a experiência do colega Edson De Pieri como sub-coordenador do Programa e com o apoio do corpo docente que se dedicava à implantação e consolidação do PPGEAS. No biênio 2010-2012, fui sub-coordenador na gestão do prof. José Cury e, posteriormente, também fui eleito membro permanente do Colegiado Delegado do Programa por três biênios seguintes.

Em nível de Graduação, as primeiras disciplinas em que atuei foram Cálculo Numérico, ministrada para o curso ECA, e Controle por Realimentação de Estados, para o Curso de EEL, em 1993. A partir de 1994, por um período de 10 anos, fui responsável por ministrar Controle Multivariável para os alunos do ECA. Dentre outras disciplinas de graduação, em diferentes períodos ao longo da carreira, ministrei para alunos do ECA as disciplinas de Sistemas Realimentados e de Sinais e Sistemas Lineares, tanto a parte teórica como de laboratório. Já em nível de pós-

graduação, a primeira disciplina em que atuei foi a de Controle Multivariável, nos dois primeiros anos e em conjunto com os professores José Cury e Julio Rico, além de atuar como docente responsável pela disciplina até 2002. Em 1996, junto com o prof. Alexandre Trofino, participei da implantação no PGEEL da disciplina Fundamentos para Análise e Projeto de Sistemas de Controle. Nesta atuei no PGEEL, em conjunto com vários colegas e em diferentes períodos da carreira docente, até 2006, e no PPGEAS a partir de 2007. Dentre outras, também ministrei Teoria de Sistemas Lineares no PGEEL e, no PPGEAS, Sistemas Dinâmicos Lineares, Técnicas de Controle Não-Linear e Metodologia Científica. Nesta última disciplina, obrigatória para os alunos do PPGEAS, eu colaborei na implantação liderada pelo colega o prof. Ubirajara Moreno.

Como participante do Corpo Docente Permanente do PPGEEL (1992 - 2007) e do PPGEAS (a partir de 2007), tive a oportunidade de orientar e coorientar vários alunos e alunas de mestrado e doutorado, originários de diferentes estados e países. Meu primeiro aluno de mestrado foi João Manoel Gomes da Silva, originário do Rio Grande do Sul, e contou com a frutuosa co-orientação do prof. José Cury, incluindo a publicação de um artigo na IEEE TAC em 1996. Após seu mestrado, João

Manoel realizou seu doutoramento no LAAS sob orientação de colega profa. Sophie, tornando-se, posteriormente, docente da UFRGS e destacado pesquisador na área de Controle sob Restrições. Meu primeiro aluno de doutorado, de nacionalidade peruana, também teve sua tese marcada por uma outra publicação na revista IEEE TAC, em 2003. No total, 16 alunos e alunas de Doutorado e 23 de Mestrado defenderam suas teses e dissertações sob minha orientação ou co-orientação. Em Setembro ocorrerá a defesa de doutorado de Carla de Souza, coorientada pelo prof. Valter Junior de Souza Leite, ambos de Minas Gerais, este um grande amigo e colaborador em pesquisas desde 2003. Carla realizou um estágio sanduíche de um ano no LAAS/França, com bolsa do Projeto PrInt Automação 4.0. Fruto da competência técnica desta jovem pesquisadora e da colaboração frutuosa entre os orientadores e a colega profa. Sophie, supervisora do estágio sanduíche, Carla defenderá sua tese sustentada com a publicação de um capítulo de livro e seis artigos em revistas científicas de primeira linha na área de Controle e Automação. Atualmente oriento dois doutorandos, Jackson Ernesto e Jaqueline Vargas, ambos oriundos do Paraná, contando

com a colaboração dos colegas prof. Eduardo Camponogara (PPGEAS/DAS/UFSC) e prof. José Mário Araújo (PPGESP/DAS/IFBA).

Ao longo de minha trajetória como docente e pesquisador na UFSC, também tive a oportunidade de participar e coordenar diversos projetos de Cooperação Científica e Acadêmica, em nível nacional e internacional, e projetos individuais de pesquisa, em grande parte, financiados pelas agências governamentais CAPES e CNPq e, no caso de cooperações bilaterais formais, realizadas essencialmente com equipes francesas cofinanciadas por organismos da França. Fui Bolsista PQ-CNPq no Nível 2 nos períodos 1993-2002 e 2005-2013 e, desde 2014, sou Bolsista PQ no Nível 1-D. Em 2014, fui aprovado no concurso para Professor Titular do DAS. Nesta trajetória, também tive a oportunidade de participar de vários congressos científicos realizados em diferentes regiões do Brasil e em vários países. Ademais, fiz parte de Comitês Científicos e da organização de diversos congressos nacionais e internacionais. Em especial, aqui em Florianópolis, participei do Comitê Local de Organização do XII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2000), coordenei o Comitê de Programa do VIII Simpósio Brasileiro

de Automação Inteligente (SBAI 2009) e fui Chair do *National Organizing Committee* do 9th *IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND'18)*, realizado de 3 a 5 de Setembro de 2018 concomitantemente ao 2nd *IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems (LPVS'18)*, contando com a valiosa colaboração do colega prof. Daniel Coutinho para o sucesso do evento. Ministrei mini-cursos em congressos em duas oportunidades, no CBA 2014 e no SBAI 2017. Fiz parte da diretoria da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) como Vice-Presidente, no biênio 2008 - 2010 e, atualmente, iniciei minha terceira participação como membro do Conselho Superior desta sociedade científica. Há cinco anos tornei-me Editor Associado do periódico *Journal of The Franklin Institute* e, desde 2019, também exerço a mesma função no *Journal of Control Automation and Electrical Systems*, periódico internacional da SBA.

Aposentei-me como Professor Titular do DAS/UFSC em dezembro de 2019, abrindo a oportunidade para a contratação de um novo professor no Departamento. Desde então, continuo a exercer atividades, principalmente, de pesquisa como Professor Voluntário

do DAS/PPGEAS. Ao longo de todos esses anos na UFSC, tive a felicidade de ter realizado minha trajetória docente e de pesquisa ligado a um grupo seleto de professores, alunos e funcionários comprometidos com suas tarefas docentes, discentes e de apoio para a realização das três tarefas fundamentais à Universidade, o ensino, a pesquisa e a extensão. Fazer parte da história do DAS/PPGEAS tem sido uma honra, assim como poder continuar a contribuir na formação de alunos e no desenvolvimento de pesquisas na área de Controle e Automação. As amizades e colaborações acadêmicas e científicas, construídas e cultivadas na UFSC e com colegas de outras instituições no Brasil e no exterior, permanecem sendo inspiradoras, mesmo no ambiente econômico e político degenerado atual do País e frente aos ataques à Universidade Pública e à Ciência. Por fim, a companhia carinhosa e o apoio da minha esposa e da minha filha, Nane e Ana Flávia, e de meus familiares, foram e continuam sendo fundamentais para o contentamento que tenho carregado em minha vida pessoal, familiar e profissional. ■



Fig. 9: Cerimônia de abertura do Joint IFAC ROCOND & LPVS, setembro de 2018, sediado em Florianópolis.



Fig. 10: Prof. Valter, Carla e eu por ocasião do recebimento do prêmio de *Young Author Award (Finalist)* - Joint IFAC ROCOND & LPVS 2018 da Carla, então orientanda de doutorado.

# Participações em eventos



Nesta seção apresentamos as participações de docentes e discentes do PGEAS em eventos nacionais e internacionais. Nas apresentações de trabalhos nós destacamos em itálico o autor que apresentou o trabalho no evento.

Boa leitura!

## 15th Workshop–School on Agents, Environments, and Applications

- **Artigo:** “The Impact of Norms Generality on MAS Goal ”  
**Autores:** *Jhonatan Alves* (doutorando PPGEAS); Jomi Fred Hubner (PPGEAS/UFSC), Jerusa Marchi (PPGCC/UFSC)

## IFAC Symposium on Biological and Medical Systems

Sept 19–22, 2021, Ghent, Belgium

- **Artigo:** “A Sequential Quadratic Programming Approach for the Predictive Control of the COVID-19 Spread”  
**Autores:** *Marcelo Menezes Morato* (doutorando PPGEAS/UFSC), Guilherme dos Reis (Iniciação Científica DAS/UFSC), Julio Elias Normey-Rico (PPGEAS/UFSC).

O Prof. Julio foi chair da sessão, com tema COVID-19.

## IFIP Conference on Advanced Production Manufacturing Systems, Nantes, França,

5–9/9/2021

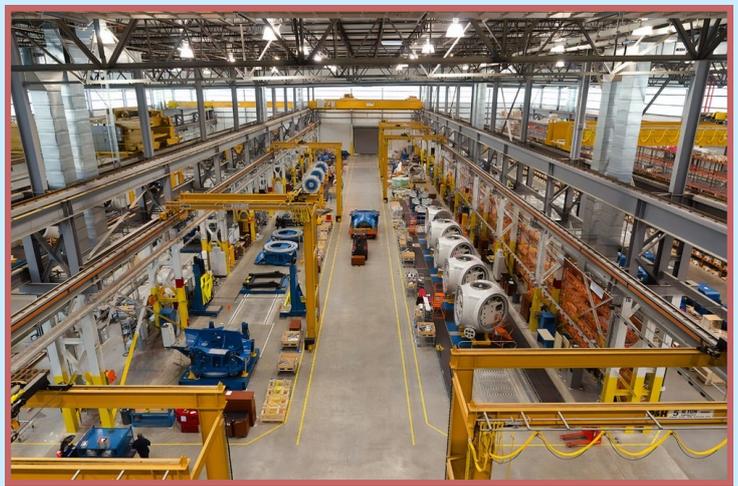
- **Artigo:** “When Softbots meet Digital Twins: Towards Supporting the Cognitive Operator 4.0”  
**Autores:** Ricardo J. Rabelo (PPGEAS); David Romero (Technology University of Mexico); Saulo P. Zambiasi (Unisul); Luciano Colares Magalhães (Mestrando PPGEAS/UFSC).

## Eventos Internacionais

### IFIP Working Conference on Virtual Enterprises, Saint Etienne, França, 22–

24/11/2021

- **Artigo:** “A framework to strengthen collaboration between universities and industrial-related entities towards boosting Industry 4.0 adoption and development”  
**Autores:** Ricardo J. Rabelo (PPGEAS).



Venha estudar **CONTROLE, AUTOMAÇÃO E SISTEMAS COMPUTACIONAIS** em um dos mais prestigiados programas de pós-graduação do Brasil! Nota 6 (de 7) na CAPES.

Cursos de mestrado e doutorado acadêmicos na melhor cidade do país:  
**Florianópolis!**

Abertura de processos seletivos 2 vezes por ano.

<https://pgeas.ufsc.br/>

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS (PPGEAS) - UFSC**

