



PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE SERVOACIONAMENTOS EM SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO DE CALOR (WHRU) DE TURBOGERADORES EM FPSOS

PROPOSAL FOR THE IMPLEMENTATION OF SERVO DRIVES IN WASTE HEAT RECOVERY SYSTEMS (WHRU) OF TURBOGENERATORS IN FPSOS

PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SERVOVARIADORES EN SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL (WHRU) DE TURBOGENERADORES EN UNIDADES FPSOS

AROLD CARLOS DA SILVA JUNIOR | sjunior132@gmail.com | Universidade de Taubaté /SP

IVAIR ALVES DOS SANTOS | ivair.santos@unitau.br | Universidade de Taubaté /SP

ARCIONE FERREIRA VIAGI | arcione.fviagi@unitau.br | Universidade de Taubaté /SP

ROQUE ANTÔNIO DE MOURA | roque.amoura@unitau.br | Universidade de Taubaté /SP

RESUMO

Esta pesquisa se concentra na análise técnica substituindo um sistema de instrumentação eletropneumático convencional que controla as paletas (*dampers*) de unidades de recuperação de calor residual (*waste heat recovery unit* - WHRU) acopladas a turbogeradores de 25 MW em plataformas offshore do tipo unidade flutuante de produção e Armazenamento (*floating production storage and offloading* - FPSO). O objetivo do estudo foi avaliar os impactos da adição de servomecanismos eletromecânicos com controle digital em malha fechada no desempenho dinâmico do sistema, na estabilidade térmica do processo e na eficiência energética macro da planta. A metodologia adotada baseou-se em uma revisão bibliográfica de artigos e manuais técnicos para elaborar a modelagem e simulação dinâmica do sistema termoenergético, calibrada com parâmetros operacionais representativos de condições reais de campo, considerando um turbogerador a gás e diesel como combustível, com potência nominal de 25 MW operando em regime típico de carga parcial. Os resultados indicaram melhorias significativas no comportamento dinâmico do sistema de controle, incluindo redução superior a 80% no tempo de resposta dos atuadores e aumento da precisão de posicionamento dos *dampers*. Observou-se também redução das oscilações térmicas no trocador de calor do WHRU, e aumento estimado de aproximadamente 3% na eficiência térmica do sistema, contribuindo para a redução do consumo específico de combustível. Adicionalmente, a arquitetura baseada em servomecanismos demonstrou potencial para elevar a confiabilidade e a disponibilidade operacional do sistema ao eliminar componentes pneumáticos suscetíveis a atrasos sistêmicos e falhas contínuas no tempo. Conclui-se que a substituição da instrumentação eletropneumática por sistemas servoacionados constitui uma alternativa tecnicamente viável para modernização de sistemas de recuperação de calor em unidades offshore, contribuindo para maior eficiência energética, estabilidade operacional e integração com arquiteturas modernas de automação industrial.

Palavras-chave: Automação industrial; Eficiência energética; FPSO; Servoacionamento; WHRU.

ABSTRACT

This research focuses on the technical analysis of replacing a conventional electropneumatic instrumentation system which controls the dampers of waste heat recovery units (WHRUs) coupled to 25 MW turbogenerators on offshore Floating Production, Storage, and Offloading (FPSO) units, with an electromechanical servomechanism system featuring closed-loop digital control. The study aimed to evaluate the impact of this upgrade on the system's dynamic performance, process thermal stability, and the plant's overall energy efficiency. The methodology involved a literature review of articles and technical manuals to develop a dynamic model and simulation of the thermal-energy system; this model was calibrated using operational parameters representative of actual field conditions, specifically for a 25 MW rated-power turbogenerator (fueled by gas and diesel) operating under typical partial-load conditions. The results indicated significant improvements in the control system's dynamic behavior, including an actuator response time reduction of over 80% and increased damper positioning accuracy. A reduction in thermal oscillations within the WHRU heat exchanger was also observed, alongside an estimated 3% increase in system thermal efficiency, contributing to lower specific fuel consumption. Furthermore, the servomechanism-based architecture demonstrated the potential to enhance system reliability and operational availability by eliminating pneumatic components prone to systemic delays and recurring failures over time. The study concludes that replacing electropneumatic instrumentation with servo-driven systems is a technically viable alternative for modernizing heat recovery systems on offshore units, contributing to improved energy efficiency, operational stability, and integration with modern industrial automation architectures.

Keywords: Industrial automation; Energy efficiency; FPSO; Servo-drive system; WHRU.

RESUMEN

Esta investigación se centra en el análisis técnico de la sustitución de un sistema de instrumentación electroneumática convencional que controla las compuertas de las unidades de recuperación de calor residual (WHRU) acopladas a turbogeneradores de 25 MW en unidades flotantes de producción, almacenamiento y descarga (FPSO) en alta mar, por un sistema de servomecanismo electromecánico con control digital de lazo cerrado. El estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de esta actualización en el comportamiento dinámico del sistema, la estabilidad térmica del proceso y la eficiencia energética global de la planta. La metodología incluyó una revisión bibliográfica de artículos y manuales técnicos para desarrollar un modelo dinámico y una simulación del sistema termoenergético; dicho modelo se calibró utilizando parámetros operativos representativos de las condiciones reales de campo, específicamente para un turbogenerador de 25 MW de potencia nominal (alimentado por gas y diésel) que opera en condiciones típicas de carga parcial. Los resultados indicaron mejoras significativas en el comportamiento dinámico del sistema de control, incluyendo una reducción superior al 80 % en el tiempo de respuesta del actuador y una mayor precisión en el posicionamiento de las compuertas. Asimismo, se observó una reducción de las oscilaciones térmicas en el intercambiador de calor de la WHRU, junto con un aumento estimado del 3 % en la eficiencia térmica del sistema, lo que contribuye a un menor consumo específico de combustible. Además, la arquitectura basada en servomecanismos demostró tener el potencial de mejorar la fiabilidad y la disponibilidad operativa del sistema al eliminar componentes neumáticos propensos a retrasos sistémicos y fallos recurrentes a lo largo del tiempo. El estudio concluye que la sustitución de la instrumentación electroneumática por sistemas accionados por servomotores es una alternativa técnicamente viable para modernizar los sistemas de recuperación de calor en unidades marinas, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética, la estabilidad operativa y la integración con arquitecturas modernas de automatización industrial.

Palabras clave: Automatización industrial; Eficiencia energética; FPSO; Sistema de accionamiento por servomotor; WHRU.

1. INTRODUÇÃO

A complexidade operacional das unidades *offshore* flutuantes para produção, armazenamento e transferência (FPSO) requerem confiabilidade, disponibilidade e eficiência energética em seus sistemas responsáveis pela geração e gerenciamento de energia térmica e elétrica a bordo que é geralmente realizada por meio de turbogeradores a gás e diesel, cuja operação contínua é essencial para assegurar a estabilidade nos processos de produção de óleo e gás (Boyce, 2012; Horlock, 2002).

Nesse contexto, o aproveitamento do calor residual proveniente dos gases de exaustão das turbinas, por meio de sistemas recuperadores do calor residual (WHRU) constituem-se uma estratégia para aumentar a eficiência térmica e otimizar o uso dos recursos energéticos. O desempenho dos sistemas de recuperação térmica dependem da estabilidade e da precisão no controle das variáveis associadas ao escoamento dos gases de combustão, particularmente a vazão e a temperatura direcionadas para o trocador de calor do WHRU (Boyce, 2012; Horlock, 2002; Kehlhofer *et al.*, 2009).

Em configurações industriais convencionais, o controle do fluxo de gases é realizado por meio do posicionamento das paletas móveis (*dampers*) de exaustão os desvios (*bypass*) que direcionam o fluxo para o recuperador de calor. O acionamento típico ocorre por sistemas de instrumentação eletropneumática compostos por atuadores e posicionadores eletropneumáticos equipados com válvulas direcionais solenoides, posicionadores analógicos e malhas de controle proporcional integral derivativo (*proportional integral derivative* - PID) gerenciados por controladores lógicos programáveis (CLPs). Embora possua ampla aplicação na indústria de processos, apresentam limitações dinâmicas decorrentes da compressibilidade do ar, da presença de desvio mecânico, de atrasos de transporte e pela falta de linearidade (Ogata, 2010).

Em sistemas térmicos acoplados com turbinas a gás, pequenas variações no posicionamento dos *dampers* provocam oscilações significativas na carga térmica transferida ao trocador de calor do WHRU. Essas oscilações impactam diretamente na estabilidade dos processos de geração de vapor ou aquecimento de utilidades, além de influenciar o regime operacional dos turbogeradores, o que prejudica a eficiência de sistemas de recuperação térmica (Boles; Çengel, 2013).

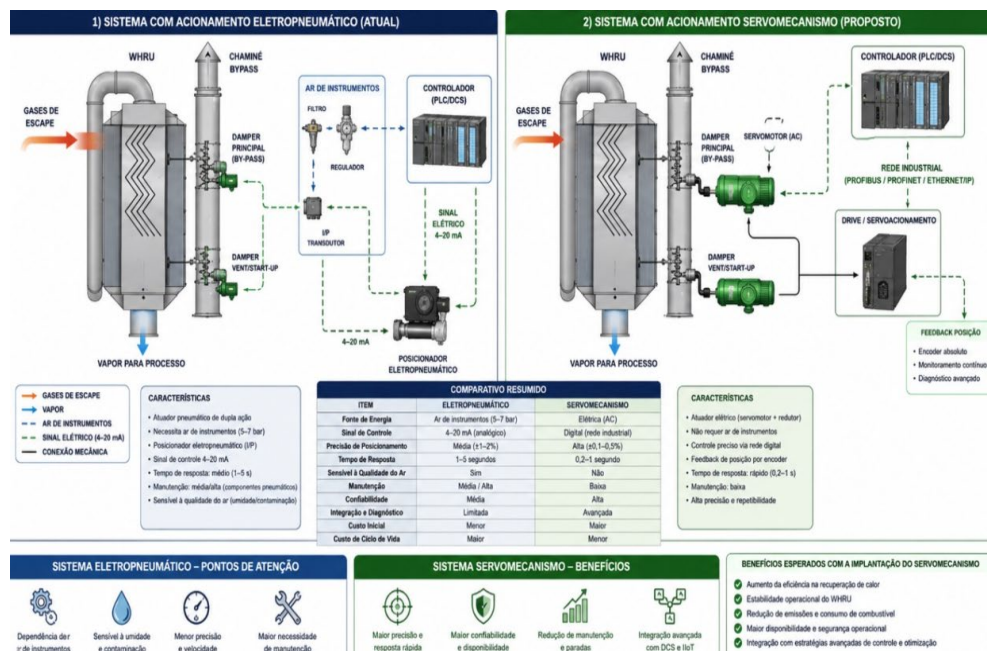
Impactos associados ao desempenho térmico, a variabilidade operacional podem afetar a confiabilidade. Sob a perspectiva da engenharia de confiabilidade, regimes operacionais sujeitos a oscilações frequentes aumentam a incidência de esforços mecânicos cíclicos e aceleram mecanismos de degradação em componentes estruturais e atuadores. Em ambientes *offshore*, caracterizados por elevada complexidade logística e custos operacionais significativos para intervenções de manutenção, a redução de falhas não programadas e o aumento da disponibilidade dos sistemas tornam-se fatores críticos para a viabilidade operacional das unidades (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

Diante dessas limitações, soluções baseadas em servomecanismos eletromecânicos com controle digital em malha fechada têm sido consideradas uma alternativa tecnológica promissora para aplicações que exigem elevado grau de precisão e resposta dinâmica. Diferentemente dos sistemas pneumáticos convencionais, servomecanismos utilizam sensores de realimentação de posição, como *encoders* ou *resolvers*, possibilitando o controle preciso do posicionamento dos atuadores e proporcionando maior repetibilidade, menor histerese e tempos de resposta significativamente reduzidos. Essas características podem contribuir para a melhoria da estabilidade térmica dos sistemas WHRU e para a otimização energética do conjunto turbina e recuperador de calor (Nise, 2017).

2. REVISÃO DA LITERATURA

No contexto da automação industrial, a integração de servomecanismos a arquiteturas modernas de controle digital possibilitam a implementação de estratégias de controle mais avançadas (Figura 1), incluindo estruturas em cascata, controle *feedforward* e algoritmos adaptativos que visam aumentar a robustez do sistema em relação aos distúrbios operacionais e variações de carga (Åström; Murray, 2008; Correia *et al.*, 2026).

Figura 1 | Esboço conceitual comparativo: servomecanismo x sistema (tradicional)



Fonte: Adaptado pelos Autores de Åström e Murray (2008).

Com todas as vantagens associadas aos servomecanismos em aplicações industriais de controle de movimento, sua aplicação em sistemas de controle de *dampers* em unidades WHRU associadas a turbogeradores instalados em FPSOs ainda é pouco explorado na literatura técnica e científica, especialmente sob a perspectiva integrada de desempenho térmico, estabilidade operacional e confiabilidade do sistema (Åström; Murray, 2008).

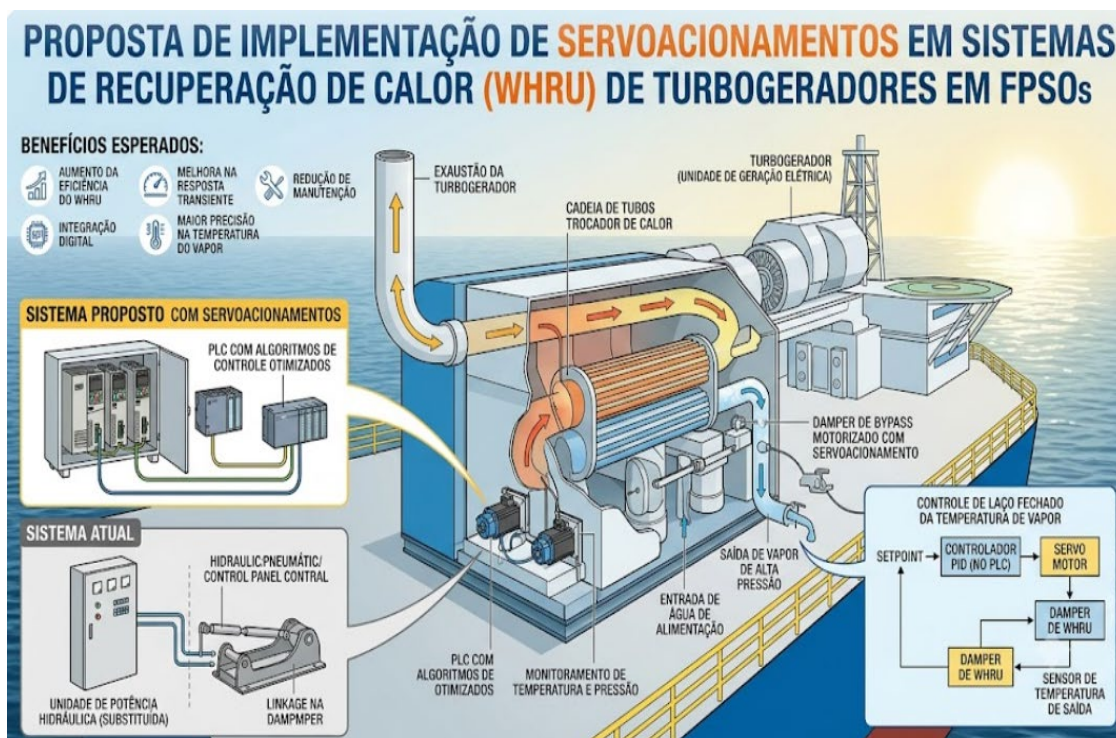
2.1 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM FPSOS

As unidades flutuantes para produção, armazenamento e transferência (FPSO) operam de forma autônoma em ambientes *offshore* exigindo sistemas energéticos capazes de garantir elevada confiabilidade e disponibilidade operacional (Boyce, 2012; Cohen; Rogers; Saravanamuttoo, 2009).

Na operação das turbinas a gás, uma parcela da energia liberada no processo de combustão é rejeitada como gases de exaustão, cuja temperatura ultrapassar a 450°C. Os sistemas de recuperação de calor residual, conhecidos como sistemas recuperadores do calor residual (WHRU) possibilitam aproveitar parte dessa energia térmica, caracterizando um sistema de cogeração, ou seja, possibilita o aumento da eficiência global do sistema energético ao converter calor residual, que seria descartado para o ambiente, em energia útil para processos industriais (Boles; Çengel, 2013).

Conforme Figura 2, em unidades *offshore*, a arquitetura energética envolve a integração entre turbogeradores, sistemas de recuperação térmica, sistemas de utilidades e plataformas de controle industrial baseadas em controladores lógicos programáveis (CLPs) em sistemas de controle (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

Figura 2 | Esboço conceitual: sistemas de utilidades e plataformas de controle industrial



Fonte: Adaptado pelos Autores de Boyce (2012).

Nessas instalações, a geração de energia elétrica é normalmente realizada por turbogeradores a diesel e gás, que convertem energia química do combustível em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica por meio de geradores acoplados. Todo o processo ocorre a partir do ciclo termodinâmico, amplamente empregado em aplicações industriais de geração de potência devido à sua robustez e elevada relação potência e peso (Boyce, 2012; Cohen; Rogers; Saravanamuttoo, 2009).

A indisponibilidade de um turbogerador pode comprometer diretamente a continuidade das operações de produção, o que reforça a necessidade de sistemas energéticos com elevado nível de estabilidade operacional, redundância e confiabilidade (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

2.2 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS DO SISTEMA WHRU

O funcionamento de sistemas de recuperação de calor residual baseia-se nos princípios da primeira lei da Termodinâmica aplicada aos sistemas abertos em regime permanente. Nessa condição, o balanço energético considera a conservação da energia associada ao escoamento dos gases quentes provenientes da turbina, possibilitando determinar a quantidade de calor transferida para o fluido de processo no trocador de calor do WHRU (Incropera *et al.*, 2014).

Segundo Incropera *et al.* (2014), variações nas condições de escoamento do fluido quente ou frio podem alterar significativamente os coeficientes convectivos, afetando o desempenho térmico global do sistema. A taxa de transferência de calor depende diretamente da área de troca térmica e da diferença de temperatura entre os fluidos envolvidos.

Boles e Çengel (2013) destacam que a instabilidade térmica pode resultar em ciclos repetitivos de expansão e contração térmica, aumentando esforços mecânicos e potencialmente reduzindo a vida útil dos componentes estruturais do equipamento. O controle adequado da vazão e da distribuição dos gases de exaustão torna-se um fator determinante para assegurar a estabilidade térmica, eficiência energética e integridade estrutural dos sistemas de recuperação de calor (Bejan, 2016).

2.3 INSTRUMENTAÇÃO ELETROPNEUMÁTICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

A instrumentação eletropneumática combina sinais elétricos de controle tipicamente na faixa de 4 a 20 mA, com atuadores pneumáticos acionados por ar comprimido possibilitando converter sinais elétricos provenientes de controladores industriais em movimentos mecânicos capazes de posicionar válvulas, paletas e outros elementos finais de controle (Ogata, 2010; Lipták, 2016; Kakaç; Liu, 2012).

Um sistema eletropneumático típico é composto por um conversor corrente e pressão (I/P), um posicionador analógico, um atuador pneumático e uma malha de controle PID implementada em um controlador industrial. Os efeitos da compressibilidade do ar, atrasos de propagação do sinal pneumático e fenômenos de histerese mecânica associados ao atrito interno e às folgas estruturais dos componentes precisam ser minimizados ou eliminados para sucesso e aumentar a precisão de posicionamento dos atuadores (Ogata, 2010).

Fogliatto e Ribeiro (2009) ensinam que os sistemas pneumáticos estão sujeitos a degradação progressiva de componentes, vazamentos e variações nas condições de operação do ar comprimido, fatores que podem aumentar a necessidade de intervenções de manutenção, impactando no tempo médio entre falhas (MTBF) e dessa forma elevam os custos de manutenção e reduzem a disponibilidade do processo industrial.

2.4 SERVOMECANISMOS ELETROMECAÑICOS APLICADOS AO CONTROLE DE PROCESSOS

Servomecanismos eletromecânicos são amplamente empregados em sistemas de controle que requerem elevada precisão de posicionamento e resposta dinâmica rápidas. Motores elétricos síncronos ou motores de corrente contínua são associados aos sensores de realimentação de posição, como *encoders* ou *resolvers* operando o controle em malha fechada (Nise, 2017).

Ainda segundo Nise (2017), a arquitetura dos servomecanismos força o controlador comparar continuamente a posição desejada com a posição real do atuador, gerando sinais de correção que reduzem o erro de posicionamento. Outra característica relevante dos servomecanismos é a ausência de efeitos associados à compressibilidade de fluidos, o que contribui para maior largura de banda e melhor capacidade de resposta frente a perturbações externas (Åström; Murray, 2008).

O controlador proporcional integral derivativo (PID) permanece como uma das estratégias de controle mais utilizadas na indústria de processos, devido à sua simplicidade de implementação e robustez (Skogestad, 2007; Levine, 2011; Seborg *et al.*, 2011).

2.5 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE OPERACIONAL

A engenharia de confiabilidade dedica-se ao estudo da probabilidade de um sistema desempenhar sua função requerida durante determinado intervalo de tempo e sob condições operacionais especificadas. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a confiabilidade está diretamente relacionada à capacidade de um sistema operar sem falhas durante seu ciclo de vida.

Entre os principais indicadores utilizados para avaliação da confiabilidade de sistemas industriais destacam-se o *Mean Time Between Failures* (MTBF), que representa o tempo médio entre falhas e o *Mean Time To Repair* (MTTR), que corresponde ao tempo médio necessário para restaurar o funcionamento do sistema após uma falha. Em ambientes offshore, onde as intervenções

de manutenção envolvem elevados custos logísticos e riscos operacionais, a maximização da disponibilidade dos sistemas torna-se um objetivo estratégico para a operação das unidades de produção (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

2.6 MODERNIZAÇÃO TECNOLÓGICA E IMPACTOS NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A modernização tecnológica de sistemas industriais, especialmente por meio da adoção de atuadores eletromecânicos e arquiteturas digitais de controle, tem sido apontada como uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência operacional e energética de plantas industriais que quando aliados aos sistemas de controle mais precisos possibilita reduzir variações operacionais e melhorar o desempenho global dos processos (Åström; Murray, 2008; IEA, 2015).

As melhorias na precisão de controle de variáveis como vazão e temperatura dos gases de exaustão impactam na eficiência energética de sistemas WHRU conforme Quadro 1 (Smith, 2016).

Quadro 1 | Desempenho comparativo: instrumentação eletropneumática × servomecanismo

Critério / Impacto	Eletropneumático	Servomecanismo
Meio de acionamento	Ar comprimido	Motor elétrico
Tipo de controle	PID analógico	Controle digital em malha fechada
Precisão angular	Média ($\pm 1-2^\circ$)	Alta ($< 0,1^\circ$)
Histerese	Moderada a elevada	Baixa
Tempo de resposta	Lento	Rápido
Repetibilidade	Moderada	Alta
Dependência de utilidades	Necessita ar comprimido	Apenas energia elétrica
Manutenção	Frequente (vedações/ vazamentos)	Reduzida
Integração digital	Limitada	Nativa
Estabilidade térmica	Maior variabilidade	Maior estabilidade
Eficiência energética	Limitado	Elevado potencial

Fonte: Adaptado pelos Autores de Smith (2016).

3.METODOLOGIA

Esta pesquisa foi conduzida como um estudo aplicado, com abordagem quantitativa voltada à avaliação de desempenho operacional, com abordagem predominantemente quantitativa, voltada à avaliação do impacto da modernização de sistemas de controle no desempenho operacional de sistemas industriais de recuperação de calor.

A investigação foi conduzida por meio de pesquisa bibliográfica em publicações alusivas ao tema e manuais técnicos (Benevides *et al.*, 2024). Um estudo de caso técnico-operacional também foi verificado em um sistema real em unidade FPSO.

O método escolhido foi utilizado em pesquisas de engenharia quando se buscou analisar sistemas complexos em condições reais de operação, especialmente em contextos industriais nos quais o controle experimental completo não era viável (Yin, 2018).

A metodologia adotada baseia-se na comparação do desempenho das arquiteturas de controle:

- sistema convencional baseado em instrumentação eletropneumática;
- sistema modernizado baseado em servomecanismos eletromecânicos;
- sistema com controle digital em malha fechada.

A análise foi realizada a partir da comparação de indicadores operacionais coletados antes e após a implementação da nova tecnologia de controle.

3.1 REVISÃO DO ESTUDO DE CASO

O sistema estudado corresponde a um arranjo típico de geração de energia e recuperação térmica utilizado em unidades offshore de produção de petróleo e gás. A configuração analisada foi composta pelos subsistemas principais:

- turbogeradores a gás operando em ciclo simples;
- dampers de exaustão responsáveis pela distribuição dos gases de combustão;
- sistema de recuperação de calor do tipo Waste Heat Recovery Unit (WHRU);
- sistema de instrumentação baseado em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs);
- sistema supervisor para monitoramento operacional.

Na configuração original do sistema, o posicionamento dos dampers era realizado por meio de atuadores pneumáticos associados a posicionadores analógicos, acionados por sinais de controle padrão industrial na faixa de 4 até 20 mA. As malhas de controle eram implementadas por meio de algoritmos PID convencionais programados no CLP. Os *dampers* têm papel fundamental na regulação da vazão de gases de exaustão direcionados ao trocador de calor do WHRU influenciando a carga térmica recuperada no sistema.

Foi realizada durante seis meses a coleta e análise de dados correspondente a operação tradicional e atual à modernização do sistema de controle, considerando as variáveis de processo:

- temperatura dos gases de exaustão;
- distribuição da vazão de gases entre WHRU e bypass;
- carga térmica transferida no trocador de calor;
- carga operacional dos turbogeradores;
- sinal de posição dos dampers;
- consumo específico de combustível (kJ/kWh);
- amplitude de oscilações térmicas (°C);
- tempo de resposta a variações de carga;
- frequência de intervenções de manutenção associadas ao sistema de atuação.

Foi realizada uma análise comparativa do comportamento dinâmico do sistema de controle considerando as configurações antes e após a modernização tecnológica. A análise concentrou-se em parâmetros clássicos de desempenho de sistemas de controle, incluindo:

- constante de tempo do sistema;
- erro em regime permanente;
- presença de histerese no sistema de atuação;
- comportamento de deadband;
- resposta dinâmica a perturbações de carga.

A interpretação dos resultados foi realizada com base em conceitos de análise de sistemas de controle descritos na literatura clássica da área (Ogata, 2010; Nise, 2017).

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SERVOACIONAMENTO

A intervenção tecnológica analisada neste estudo consistiu na substituição dos atuadores pneumáticos existentes por servomecanismos eletromecânicos com controle digital em malha fechada. A nova configuração implementada incluiu:

- servomotores elétricos para acionamento dos dampers;
- sensores de realimentação de posição por meio de encoders absolutos;
- integração dos atuadores ao sistema de controle baseado em CLP;
- reconfiguração das lógicas de controle;
- ajuste e otimização dos parâmetros das malhas PID;
- integração com o sistema supervisório para monitoramento em tempo real.

Durante a implementação, foram definidos pontos de medição e instrumentação previamente utilizados, garantindo consistência e comparabilidade entre os cenários analisados. Essa arquitetura de controle permite maior precisão de posicionamento e maior capacidade de resposta dinâmica em comparação com sistemas pneumáticos convencionais.

Após a implementação do novo sistema de controle, foi realizado um monitoramento operacional possibilitando comparar os dois cenários operacionais conduzida pelos indicadores:

- consumo específico de combustível;
- estabilidade térmica do sistema WHRU;
- tempo de resposta a variações de carga;
- repetibilidade de posicionamento dos dampers;
- indicadores de confiabilidade operacional.

A análise da confiabilidade do sistema considerou métricas clássicas de engenharia de manutenção, incluindo o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) e a frequência de intervenções corretivas com a disponibilidade operacional foi estimada com base nas formulações clássicas da engenharia de confiabilidade (Fogliatto; Ribeiro, 2009).

Os dados operacionais obtidos antes e após a modernização do sistema foram comparativamente analisados quanto o objetivo, ganhos associados e precisão:

- redução da variabilidade operacional do sistema;
- melhoria da estabilidade térmica do trocador de calor;
- redução do consumo específico de combustível;
- melhoria da precisão de posicionamento dos dampers;
- alterações nos indicadores de confiabilidade do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESEMPENHO DINÂMICO DO SISTEMA DE CONTROLE

A análise teve como objetivo avaliar os impactos dessa modernização tecnológica sobre o desempenho dinâmico do sistema de controle variando entre 480°C e 520°C quando direcionados ao sistema WHRU para recuperação de energia térmica.

4.1.1 TEMPO DE RESPOSTA A DEGRAUS DE CARGA

Foi aplicado um degrau de 10% na carga elétrica do turbogerador, avaliando-se o comportamento do damper de bypass do WHRU e a estabilização térmica do sistema.

Observou-se redução de aproximadamente 81% no tempo de resposta e melhora significativa na estabilidade térmica do trocador de calor conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 | Comparativo da capacidade de resposta: instrumentação eletropneumática × servomecanismo

Parâmetro Avaliado	Eletropneumático	Servomecanismo
Tempo de resposta (10 - 90%)	18,8 s	0,9 s
Tempo de acomodação ($\pm 2\%$)	28 s	5 s
<i>Overshoot</i> térmico	9,5%	1,2%
Erro em regime permanente	$\pm 5,8\%$	$\pm 0,3\%$

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

4.2 PRECISÃO E REPETIBILIDADE DE POSICIONAMENTO DOS DAMPERS

Foram realizados 200 ciclos de abertura e fechamento parcial (20% a 80%) para análise de histerese e repetibilidade conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 | Comparativo dos ciclos de abertura/fechamento parcial: eletropneumática × servomecanismo

Indicador Avaliado	Eletropneumático	Servomecanismo
Histerese média	6,7%	0,2%
Erro de posicionamento	±4,5°	±0,05°
Repetibilidade	±6,2%	±0,1%
Resolução angular	~2,5°	0,01°

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A eliminação da compressibilidade do ar e das folgas mecânicas associadas aos atuadores pneumáticos resultou em ganho expressivo de precisão, impactando diretamente o controle da vazão de gases de combustão.

4.3 ESTABILIDADE TÉRMICA DO WHRU

A estabilidade térmica foi avaliada por meio do desvio padrão da temperatura de saída do trocador de calor sob carga variável durante 24 horas de operação conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 | Comparativo da estabilidade térmica: eletropneumática × servomecanismo

Indicador Avaliado	Eletropneumático	Servomecanismo
Desvio padrão térmico	8,4 °C	2,1 °C
Oscilação máxima	±15 °C	±4 °C
Frequência de microcorreções PID	Alta	Baixa

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A melhoria na precisão de controle reduziu oscilações térmicas em aproximadamente 75%, diminuindo tensões térmicas no feixe tubular do trocador.

4.4 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

Foi analisado o consumo específico (Heat Rate equivalente) ao longo de 30 dias simulados de operação contínua conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 | Comparativo do consumo específico (*heat rate equivalente*)

Indicador Avaliado	Eletropneumático	Servomecanismo
Consumo específico médio	10.420 kJ/kWh	10.110 kJ/kWh
Redução percentual	—	2,97%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A melhoria na modulação do fluxo de gases permitiu maior recuperação térmica e redução estimada de quase 3% no consumo específico, valor expressivo em plantas offshore de grande porte.

4.5 IMPACTO NA CONFIABILIDADE OPERACIONAL

Foi realizada simulação baseada em dados típicos de campo para cálculo de indicadores de confiabilidade conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 | Comparativo da estabilidade térmica: eletropneumática × servomecanismo

Indicador Avaliado	Eletropneumático	Servomecanismo
MTBF estimado	11.000 h	22.500 h
MTTR médio	8 h	3 h
Disponibilidade operacional	91,2%	99,1%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Os resultados demonstram que a modernização da instrumentação aplicada ao WHRU em ambiente offshore é tecnicamente viável e operacionalmente vantajosa.

O controle por servomecanismos em malha fechada apresentou comportamento dinâmico superior, maior estabilidade térmica e impacto positivo direto na eficiência energética e confiabilidade dos turbogeradores instalados em unidades do tipo FPSO.

A eliminação de linhas pneumáticas, filtros, reguladores e posicionadores analógicos reduziu significativamente pontos potenciais de falha conforme mostra uma análise comparativa consolidada no Quadro 2.

Quadro 2 | Desempenho comparativo consolidado entre sistemas eletropneumático x servomecanismo

Critério Técnico	Sistema Eletropneumático	Sistema com Servomecanismo
Princípio de atuação	Pneumático e controle analógico	Motor elétrico com <i>encoder</i>
Controle	PID analógico	PID digital / cascata
Histerese	Moderada a alta	Mínima
Velocidade de resposta	Média	Alta
Precisão angular	Baixa	Muito alta
Estabilidade térmica	Oscilatória	Estável
Consumo energético	Maior (perdas térmicas)	Otimizado
Confiabilidade	Sensível a vazamentos	Elevada
Manutenção	Frequente	Reduzida
Integração digital	Limitada	Total (PLC/SCADA)

Fonte: Adaptado pelos Autores de Smith (2016).

A redução das oscilações térmicas também sugere potencial aumento da vida útil de componentes críticos, como tubos do trocador de calor e suportes estruturais, devido à menor fadiga térmica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa aplicada cumpriu com sucesso o objetivo de avaliar os impactos técnicos, energéticos e operacionais da substituição de sistemas de instrumentação eletropneumática convencional por servomecanismos eletromecânicos com controle digital em malha fechada em unidades de recuperação de calor residual (WHRU) acopladas a turbogeradores de 25 MW em plataformas do tipo FPSO. A modernização tecnológica proposta demonstrou ser uma alternativa altamente viável e superior em todos os critérios analisados.

Sob a perspectiva do desempenho dinâmico e de controle, a implementação dos servoacionamentos mitigou os efeitos deletérios da compressibilidade do ar e da histerese mecânica inerentes aos sistemas convencionais, resultando em um ganho expressivo de precisão angular, reduzindo o erro de posicionamento das paletas (*dampers*) para $\pm 0,05^\circ$.

Adicionalmente, verificou-se uma redução superior a 80% no tempo de resposta dos atuadores, que decaiu de 18,8 segundos para apenas 0,9 segundo e cujos reflexos dessa precisão de controle estenderam-se diretamente ao comportamento termo energético da planta, evidenciado pela estabilidade térmica e pela eficiência energética. A modulação otimizada do fluxo de gases

de exaustão propiciou um aumento na recuperação de calor, gerando uma redução de 2,97% no consumo específico de combustível (*heat rate*) dos turbogeradores.

No âmbito da engenharia de confiabilidade e disponibilidade operacional, fatores críticos em ambientes *offshore* devido à complexidade logística, a eliminação de linhas pneumáticas e componentes analógicos vulneráveis a vazamentos mostrou-se estratégica. O Tempo médio entre falhas (MTBF) estimado dobrou para 22.500 horas, enquanto a disponibilidade operacional da planta foi elevada de 91,2% para 99,1%.

Conclui-se, portanto, que a transição para sistemas servoacionados transcende o ganho de precisão isolado, consolidando-se como uma solução macroenergética indispensável para a modernização de FPSOs, alinhando a operação à sustentabilidade, eficiência de custos e aos preceitos modernos da automação industrial digital.

6. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro sugere-se a validação experimental em ambiente operacional real com dados operacionais associado as variabilidades de processo, perturbações operacionais e fatores ambientais típicos de ambientes *offshore*.

REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback systems: an introduction for scientists and engineers**. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- BENEVIDES, M. P.; XAVIER, K. R. S. L.; SILVA, A. P. S.; et al. **Sign talk assistive technology**: real-time recognition of the libras typical alphabet using artificial intelligence. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, São Paulo (SP), v. 18, n. 12, p. e010610, 2024. DOI: 10.24857/rgsa.v18n12-214. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-214>
- BOLES, M. A.; ÇENGEL, Y. A. (2013). **Thermodynamics: an engineering approach**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
- BOYCE, M. P. **Gas turbine engineering handbook**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 2012.
- COHEN, H.; ROGERS, G. F. C.; SARAVANAMUTTOO, H. I. H. **Gas turbine theory**. 6. ed. Harlow: Pearson Education, 2009.
- CORREIA, F. E.; VIAGI, A. F.; MOURA, R. A. Engenharia de suprimentos multinível: um estudo sobre a padronização do AVAC-R em uma Instituição de Ensino. *Revista Ciências Exatas*, Taubaté, v. 32, n. 2, p. 1-14, 2026. DOI: 10.69609/1516-2893.2026.v32.n2.a4027. Disponível em: <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/4027>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. (2009). **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- HORLOCK, J. H. **Combined power plants: including combined cycle gas turbine (CCGT) plants**. Oxford: Pergamon Press, 2002.
- IEA. International Energy Agency. **Waste heat recovery: technology and opportunities in industrial processes**. Paris: IEA, 2015.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- KEHLHOFER, Rolf et al. **Combined-cycle gas & steam turbine power plants**. 3. ed. Tulsa: PennWell, 2009.
- LEVINE, William S. **The control handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- LIPTÁK, Béla G. **Instrument engineers' handbook: process control and optimization**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- NISE, Norman S. **Control systems engineering**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- OGATA, Katsuhiko. **Modern control engineering**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
- SEBORG, Dale E. et al. **Process dynamics and control**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- SKOGESTAD, Sigurd. **Multivariable feedback control: analysis and design**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2007.
- SMITH, Robin. **Chemical process design and integration**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2016.
- YIN, Robert K. **Case study research and applications: design and methods**. 6. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018.

