UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física

PROJETO DE PESQUISA

Diagnóstico termoeconômico de sistemas industriais de poligeração de energia

COORDENADOR:

Adriano da Silva Marques

Janeiro de 2022

Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA
Rua Cento e Sessenta e Três, 300 – Garapu
54518-430 Cabo de Santo Agostinho/PE
www.ppengfis.ufrpe.br

I- IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

1- Título	
Diagnóstico termoeconômico de sistemas industriais de poligeração de energia	
2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	02/2022
Término previsto (mês/ano):	01/2026
3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	ENGENHARIAS
Número do código:	3.00.00.00-9
Nome da sub-área :	ENGENHARIA MECÂNICA
Número do código:	3.05.00.00-1
Nome da especialidade:	ENGENHARIA TÉRMICA
Número do código:	3.05.02.00-4
4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
☐	Materiais Nanoestruturados
☒	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
☐	Metrologia e Instrumentação
☐	Espectroscopia coerente e óptica não linear
☐	Controle e dinâmica não linear
5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Alto desempenho	• Termoeconomia
• Código computacional	• Poligeração
• Eficiência energética	

Cabo de Santo Agostinho, 26 de janeiro de 2022.

Adriano da Silva Marques

Coordenador: Adriano da Silva Marques
(SIAPE: [1582891])

6- Participantes docentes:

Nome:	Adriano da Silva Marques
CPF:	028510364-40
E-mail:	adriano.marques@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☒ Colaborador ☐

Nome:	Albert Stevens Reyna Ocas
CPF:	700287194-33
E-mail:	albert.reyna@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?: PQ-2
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Rafael Alves de Oliveira
CPF:	060534824-39
E-mail:	rafael@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Weliton Soares Martins
CPF:	055580144-66
E-mail:	weliton.martins@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

Poligeração de energia significa a produção simultânea de potência, calor para processos e água gelada para uso em sistemas de refrigeração. A termoeconomia tem se demonstrado como uma disciplina eficiente na avaliação desses sistemas, associando conceitos da termodinâmica à conceitos econômicos. Neste contexto, o presente projeto de pesquisa trata do diagnóstico termoeconômico de sistemas industriais de poligeração de energia. Estudos de caso específicos serão realizados em diferentes plantas industriais para fins de validação dos estudos e para o desenvolvimento de códigos computacionais de simulação. Diferentes metodologias de avaliação termoeconômica serão empregadas, a exemplo da TCE (Teoria do Custo Exergético), SPECO (Custo da Exergia Específica), UFS (Energia interna, Trabalho de fluxo e Entropia), MOPSA (Análise da Estrutura Produtiva Modificada), dentre outras. Assim, serão contabilizados monetariamente os fluxos de energia do sistema. As análises serão desenvolvidas pela simulação no software EES (*Engineering Equation Solver*) para as condições termodinâmicas determinadas na fase de coleta de dados. Ao final de cada estudo de caso específico, serão apresentados os resultados de pressão, temperatura, vazão, entropia e exergia para cada fluxo em diferentes condições de operação e demanda. Também serão apresentadas as eficiências de cada equipamento presente na planta industrial, os valores das irreversibilidades, os custos dos insumos e dos produtos e o diagnóstico de oportunidade de otimização a partir dos resultados dos parâmetros termoeconômicos. Através deste projeto, serão solicitadas bolsas de mestrado junto à FACEPE, CAPES e CNPq para auxiliar na consolidação das atividades de pesquisa no Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Campus das Engenharias (UACSA-UFRPE). O projeto carrega aspectos de inovação, por se tratar da aplicação de novas metodologias de avaliação da eficiência energética em equipamentos e processos industriais e pela possibilidade do desenvolvimento de ferramentas computacionais a partir de estudos de caso aplicados.

2. Introdução

Os sistemas de poligeração de energia aplicados em plantas industriais possuem grandes vantagens em relação ao melhor aproveitamento dos recursos de combustível, pois está associado a eficiência energética, redução de custos específicos e ainda traz benefícios ambientais, devido ao aproveitamento de produtos antes jogados na atmosfera [1,2]. Os fatores determinantes para a aplicação de tecnologias de poligeração foram discutidos pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [3] e incluem: a disponibilidade de combustível, tipo de tecnologia, legislação, projeto e custos. O estudo e a avaliação de sistemas de poligeração podem contar com a contribuição de diferentes pontos de vista e a soma dos resultados dessas análises serve de importante diagnóstico energético, econômico e de impacto ambiental, como poder ser visto nas avaliações de Alcântara et al. [4].

A busca crescente pela redução das ineficiências, redução do desperdício monetário e redução dos impactos ambientais de sistemas térmicos [5,6] está levando ao aumento da demanda por equipamentos mais eficientes e ambientalmente amigáveis. Desta forma, a indústria de modo geral tem trabalhado para produzir equipamentos cada vez mais eficientes, já que esforço empregado em tecnologia de conservação de energia se justifica do ponto de vista econômico, social e ambiental [7,8]. O estudo da termodinâmica é indispensável para análise e desenvolvimento de projetos de sistemas térmicos mais eficientes. No entanto, se a otimização desses sistemas for desenvolvida apenas em termos de eficiência termodinâmica, o resultado pode ser um projeto de custo elevado [9]. Portanto, os ciclos térmicos devem ser analisados e

otimizados na perspectiva da Termoeconomia [10,11]. Esta, desempenha um papel importante para a solução da problemática apresentada, já que combina princípios de termodinâmica e economia para investigar como a energia e os recursos se degradam, como minimizar o consumo energético e evitar a degradação ambiental por meio da redução de resíduos [12]. A vertente termoeconômica que adota a exergia como a única base racional para a alocação de custos das interações que um componente, grupo de componentes ou todo o sistema experimenta com o ambiente e com suas fontes de ineficiências é chamada Exergoeconomia [13]. Para desenvolver esse tipo de análise, diversas abordagens foram propostas, como a TCE (Teoria do Custo Exergético) [14], o método SPECO (Custo da Exergia ESpecífica) [15,16] e o método UFS (U: energia interna; F: trabalho de fluxo; S: entropia) [17,18].

Avaliações de sistemas de poligeração permitem a confirmação da viabilidade termoeconômica [19] e a consequente expansão da geração industrial [20, 21]. Trigeração tem estado no centro das atenções do mercado de fontes alternativas de energia devido aos benefícios econômicos obtidos [22]. Dessa forma, considerando os impactos das ineficiências termodinâmicas e impactos monetários associados à crescente demanda por sistemas de poligeração eficientes, destaca-se a importância de estudos que visem sua avaliação e melhoria de desempenho. Análises que consideram eficiência exergética, destruição de exergia e impacto econômico em conjunto podem fornecer informações valiosas e mais amplas sobre uma planta industrial e equipamentos. Grandes contribuições se aplicam tanto em tomadas de decisões em projetos, quanto para justificar possíveis alterações em sistemas já instalados.

3. Objetivos

Geral:

Realizar diagnóstico termoeconômico de sistemas industriais de poligeração de energia.

Específicos:

- Apresentar estudos de caso específico em diferentes plantas industriais, com diferentes configurações e demandas energéticas;

- Coletar dados das propriedades termodinâmicas para as análises, por meio de visitas às instalações industriais;

- Avaliar as eficiências termodinâmicas dos equipamentos das plantas industriais;

- Aplicar um método termoeconômico para validação do estudo de caso;

- Apontar as ineficiências termoeconômicas dos equipamentos;

- Propor melhorias para aumento das eficiências termodinâmicas e redução dos desperdícios monetários;

- Apresentar um código computacional para simulação de sistemas equivalentes.

4. Metodologia

Este projeto abarcará planos de trabalho específico, distribuído por cada um dos orientandos do PPENGFIS que optarem por esta área de estudo. Cada plano de trabalho estará associado a uma aplicação de um método termoeconômico para uma planta industrial específica em determinada configuração de operação. A planta industrial selecionada para o estudo deverá atender pelo menos quatro demandas energéticas, podendo ser: elétrica, calor para produção de vapor, calor de processo químico e calor para produção de frio em um equipamento de refrigeração. Também deverá conter equipamentos que trabalham com calor e potência, tais como: caldeiras, moto-geradores, turbogeradores, condensadores, bombas hidráulicas, *chiller* de refrigeração, torre de arrefecimento, tubulações e válvulas. Depois de selecionada, serão realizadas visitas técnicas às instalações industriais para reconhecimento de equipamentos, estabelecimento de diagrama esquemático, definição dos volumes de controle e coleta das informações de temperatura, pressão e vazão em cada ponto da unidade. As coletas serão realizadas em diferentes dias, diferentes condições de operação, horários de pico e fora de pico de demanda.

Serão admitidas as seguintes considerações para a análise termodinâmica: (1) os equipamentos operam em regime permanente; (2) as variações de energia cinética e potencial dos fluidos ao escoar através dos volumes de controle são desprezíveis; (3) não há variação de pressão dos fluidos dentro dos trocadores de calor; (4) o processo que ocorre no dispositivo de expansão é isentálpico; (5) não há trocas de calor entre os componentes e suas respectivas vizinhanças; (6) as propriedades dos fluidos não variam ao longo da seção transversal das tubulações; (7) pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar ambiente são 101,325 kPa, 28°C e 0,68, respectivamente.

A análise energética começa com a definição dos estados termodinâmicos de todos os fluxos que compõem o processo, a começar pelos que possuem, ao menos, duas propriedades termodinâmicas conhecidas. Com os estados termodinâmicos definidos, serão aplicadas as equações da conservação da massa, balanço de energia, cálculo das irreversibilidades e balanço de exergia em cada equipamento do sistema. O método de avaliação termoeconômico deverá ser especificado: TCE (Teoria do Custo Exergético), SPECO (Custo da Exergia Específica), UFS (Energia interna, Trabalho de fluxo e Entropia), MOPSA (Análise da Estrutura Produtiva Modificada). A metodologia deve se basear nos conceitos de produto “P” (exergia que contém os benefícios obtidos), insumo “F” (exergia proporcionada pelos recursos) e custo de exergia unitária, que se refere à exergia externa necessária para disponibilizar um fluxo de exergia dentro de um determinado processo de produção. A diferença entre insumo e produto, dentro de um processo, é igual a sua irreversibilidade, que é sempre igual ou maior que zero. O custo de exergia unitária de qualquer produto é sempre igual ou superior a um.

As análises serão desenvolvidas no software EES (*Engineering Equation Solver*) para as condições termodinâmicas determinadas na fase de coleta de dados e que possibilitará a simulação em diferentes condições de operação desta planta.

5. Resultados esperados

Os resultados do projeto serão avaliados e medidos ao fim de cada plano de trabalho de cada estudante. Portanto, espera-se para cada plano de trabalho uma ferramenta computacional para diagnóstico termoeconômico de sistemas industriais de poligeração de energia, validada por um estudo de caso de uma planta específica. Também serão apresentados os resultados da coleta das informações de temperatura, pressão e vazão de cada ponto da planta industrial selecionada, os resultados da destruição de exergia e as eficiências energética e exergética em cada um dos equipamentos avaliados. Os custos dos insumos e dos produtos serão determinados, assim como os parâmetros termoeconômicos que

servirão como base do diagnóstico das ineficiências e desperdícios energéticos e monetários da planta. Dessa forma, será possível comparar os resultados entre si e identificar diferenças e semelhanças nos valores finais, possibilitando uma análise crítica do método termoeconômico utilizado e da configuração do industrial avaliada. Espera-se o registro do software junto ao INPI, publicação de artigos em congressos da área de estudo e publicação de artigos científicos em revistas internacionais qualificadas. Por fim, espera-se a formação de mão-de-obra qualificada nesta área de atuação.

6. Cronograma de atividades

Semestre / Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8
I	X	X	X	X	X	X	X	X
II	X	X						
III	X		X		X		X	
IV	X	X	X	X	X	X	X	X
V		X		X		X		X
VI		X		X		X		X
VII				X				X

Atividade I	Estudar artigos científicos relacionados ao tema do projeto.
Atividade II	Aprimorar o projeto conceitual.
Atividade III	Selecionar as plantas industriais para cada plano de trabalho específico.
Atividade IV	Orientar os estudantes de mestrado de acordo com os planos de trabalho.
Atividade V	Escrever e divulgar os relatórios de acompanhamento do projeto.
Atividade VI	Elaborar e publicar artigos científicos.
Atividade VII	Elaborar e registrar os códigos computacionais no INPI.

7. Apoio financeiro e/ou institucional

O projeto contará com a submissão de solicitações de bolsas de mestrado e iniciação científica à FACEPE, CNPq e CAPES.

Além disso, o projeto também contará com recursos de parcerias com empresas do setor produtivo que estejam interessadas no projeto e das indústrias que por ventura sejam selecionadas para os estudos de caso específicos.

8. Referências

[1] Dabwan, Y. N.; Ganga, P.; Li, J.; Gao, G.; Feng, J. Development and assessment of integrating parabolic trough collectors with gas turbine trigeneration system for producing electricity, chilled water, and freshwater. Energy 2018; 162:364-379. Doi:10.1016/j.energy.2018.07.211.

[2] Bellos, E.; Tzivanidis, C. Multi-objective optimization of a solar driven trigeneration system. Energy 2018; 149:47-62. Doi:10.1016/j.energy.2018.02.054.

[3] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (2016). Cogeneration and trigeneration — how to produce energy efficiently. A practical guide for experts in emerging and developing economies. http://www.dfic.de/image s/pdf/cogen eration-trige nerat ion-guide .pdf. Accessed 21 May 2021.

[4] Alcântara, S. C. S.; Ochoa, A. A. V.; Costa, J. A. P.; Michima, P. S. A.; Silva, H. C. N. Natural gas based trigeneration system proposal to na ice cream factory: an energetic and economic assessment. Energ. Convers. Manage. 2019; 197:111860. Doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111860.

[5] Marques, A.; Carvalho, M.; Lourenço, A. B.; Santos, C. A. C. Energy, exergy, and exergoeconomic evaluations of a micro-trigeneration system. J. Braz. Soc. Mech. Sci. 2020; 42:324. Doi: 10.1007/s40430-020-02399-y.

[6] Marques, A.; Carvalho, M.; Ochoa, A. A. V.; Abrahao, R.; Santos, C. A. C. Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system. Energy 2020; 216:119310. Doi.org/10.1016/j.energy.2020.119310.

[7] Panahizadeh, F.; Hamzehei, M.; Farzaneh-Gord, M.; Ochoa, A. A. V. Energy, exergy, economic analysis and optimization of single-effect absorption chiller network. J. Therm. Anal. Calorim. 2020. Doi: 10.1007/s10973-020-09966-4.

[8] Leite, G. N. P.; Weschenfelder, F.; Araújo, A. M.; Ochoa, A. A. V.; Neto, N. F. P.; Kraj, A. An economic analysis of the integration between air-conditioning and solar photovoltaic systems. Energ. Convers. Manage. 2019; 185:836-849. Doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.037.

[9] Nwosu, P. N. Thermal systems and thermal efficiency index deficiency - A thermodynamic case study of regenerative and CSP plants. Case Studies in Thermal Engineering 2019; 100425. Doi:10.1016/j.csite.2019.100425.

[10] Yu, W.; Xu, Y.; Wang, H.; Ge, Z.; Wang, J.; Zhu, D.; Xia, Y. Thermodynamic and termoeconomic performance analyses and optimization of a novel power and cooling cogeneration system fueled by low-grade waste heat. Appl. Therm. Eng. 2020; 115667. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115667.

[11] Picallo-Pereza, A.; Lazzaretto, A.; Sala, J. M. Overview and implementation of dynamic thermoeconomic & diagnosis analyses in HVAC&R systems. Journal of Building Engineering 2020; 101429. Doi:10.1016/j.jobe.2020.101429.

[12] Lozano, M. A.; Valero, A. Theory of the exergetic cost. Energy Oxford 1993; 18:939-939.

[13] Lazaretto, A.; Tsatsaronis, G. SPECO: A Systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. Energy 2006; 31:1257-1289. Doi: 10.1016/j.energy.2005.03.011.

[14] Pina, E. A.; Lozano, M. A.; Serra, L. M. Allocation of economic costs in trigeneration systems at variable load conditions including renewable energy sources and thermal energy storage. Energy 2018; 151:636-646. Doi: 10.1016/j.energy.2018.03.083.

[15] Souza, R. J.; Santos, C. A. C.; Ochoa, A. A. V.; Marques, A. S.; Neto, J. L. M.; Michima, P. S. A. Proposal and 3E (energy, exergy, and exergoeconomic) assessment of a cogeneration system using an

organic Rankine cycle and an absorption refrigeration system in the northeast Brazil: Thermodynamic investigation of a facility case study. Energ. Convers. Manage. 2020; 113002. Doi:doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113002.

[16] Petrakopoulou, F.; Tsatsaronis, G.; Morosuk, T.; Carassai, A. Advanced exergoeconomic analysis applied to a complex energy conversion system. J. Eng. Gas Turb. Power 2012; 134:031801. Doi:10.1115/1.4005115.

[17] Lourenço, A. B.; Silvia, A. N.; Santos, J. J. C. S.; Donatelli, J. L. M. Application of an alternative thermoeconomic approach to a two-stage vapour compression refrigeration cascade cycle. J. Braz. Soc. Mech. Sci. 2015; 37:903-913. Doi: 10.1007/s40430-014-0210-7.

[18] Fortes, A. F. C.; Carvalho, M.; Silva, J. A. M. Environmental impact and cost allocations for a dual product heat pump. Energ. Convers. Manage. 2018; 173:763-772. Doi:10.1016/j.enconman.2018.07.100.

[19] Ata, C.; Javad, H.; Mohsen, A. Effect of recycling on the thermodynamic and thermoeconomic performances of SOFC based on trigeneration systems; A comparative study. Energy 2017; 613-624. Doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.019.

[20] Shukun, W.; Chao, L.; Jie, L.; Zhuang, S.; Xiaoxue, C.; Xiaonan, W. Exergoeconomic analysis of a novel trigeneration system containing supercritical CO2 Brayton cycle, organic Rankine cycle and absorption refrigeration cycle for gas turbine waste heat recovery. Energ. Convers. Manage. 2020; 221: 113064. Doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113064.

[21] Mohammad, Z.; Hamed, H.; Ata, C.; Masood, S. Exergoeconomic and environmental analyses of a novel trigeneration system based on combined gas turbine-air bottoming cycle with hybridization of solar power tower and natural gas combustion. Appl. Therm. Eng. 2021; 188:116610. Doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116610.

[22] Towhid, G.; Mohammad, V.; Hadi, R. Exergoeconomic optimization of a new trigeneration system driven by biogas for power, cooling, and freshwater production. Energ. Convers. Manage. 2020; 205: 112417. Doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112417.