

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA 2



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA 2



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Bruno Oliveira
Indexação: Gabriel Motomu Teshima
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia mecânica 2 /
Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João
Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-582-9

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.829212810>

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz
(Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.
CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica, materiais e automação, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas. Pode-se ainda estabelecer que estas características levam a alterações quase que imediatas no projeto, sendo uma modificação constante na busca por melhores respostas e resultados.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Boa leitura.

Henrique Ajuz Holzmann

João Dallamuta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

EFICIÊNCIA E CONSUMO ENERGÉTICO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA NO SETOR AUTOMOTIVO BRASILEIRO

Rafael Guimarães Oliveira dos Santos

Aloísio Santos Nascimento Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128101>

CAPÍTULO 2..... 8

ANÁLISE COMPARATIVA DOS TIPOS DE ÁGUA E ELETRÓLITOS DE UM GERADOR DE HIDROGÊNIO PARA UM VEÍCULO CONVENCIONAL

Thiago Gonçalves de Oliveira

Fábio Luís Figueiredo Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128102>

CAPÍTULO 3..... 19

A REVIEW ON ITERATIVE AND SERIES SOLUTIONS FOR KEPLER'S EQUATION

Paula Cristiane Pinto Mesquita Pardal

Mariana Pereira de Melo

João Francisco Nunes de Oliveira

Leonardo de Oliveira Ferreira

Pedro Novak Nishimoto

Roberta Veloso Garcia

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128103>

CAPÍTULO 4..... 36

A-CAES (ADIABATIC COMPRESSOR AIR ENERGY STORAGE): APARATO EXPERIMENTAL EM ESCALA LABORATORIAL

Roberto Sihnel

Thiago Antonini Alves

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128104>

CAPÍTULO 5..... 51

LA IMPORTANCIA DE LA FACTORIZACIÓN EN LA INGENIERÍA MECÁNICA PARA DETERMINAR LA ALTURA MÁXIMA DE PRESIÓN EN LAS TURBOBOMBAS

Juan Antonio Tena Verdejo

Francisco Santiago Gabino

Sandra Zulema Tena Galván

Víctor Francisco Cortes Ávila

José Salvador

Oropeza Ramírez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128105>

CAPÍTULO 6..... 59

MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL

ÁLABE DE UN IMPULSOR CERRADO DE LAS TURBO BOMBAS

Juan Antonio Tena Verdejo
Francisco Santiago Gabino
Sandra Zulema Tena Galván
Victor Francisco Cortes Ávila

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128106>

CAPÍTULO 7..... 68

PROJETO DE TÚNEL DE VENTO DE BAIXA VELOCIDADE

Arthur de Lima Queiroga
Rhander Viana
Olexiy Shynkarenko

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128107>

CAPÍTULO 8..... 79

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN MECANISMO DE SCOTCH-YOKE A TRAVÉS DE LA INTERFAZ SOLIDWORKS-MATLAB

Javier Guevara Rivera
Adolfo Manuel Morales Tassinari
María Esperanza Velasco Ordóñez
Carlos Efrén Jiménez Acosta

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128108>

CAPÍTULO 9..... 88

COMPARATIVO ENTRE UM OSSO COM PROPRIEDADES MECÂNICAS ISOTRÓPICAS E ORTOTRÓPICAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS EM UMA FRATURA

Igor Emanuel Espindola Loureiro
Celso Júnio Aguiar Mendonça
Ivan Moura Belo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8292128109>

CAPÍTULO 10..... 100

ANALYSIS OF DELAY COMPENSATION METHODS IN HARDWARE-IN-THE-LOOP TESTS

Eduardo Moraes Coraça
Janito Vaqueiro Ferreira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.82921281010>

CAPÍTULO 11..... 113

METODOLOGIA SEIS SIGMA: APLICAÇÃO NUMA EMPRESA DE ROLHAS METÁLICAS DO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

Edry Antonio Garcia Cisneros
Daniel Guzmán del Río
Israel Gondres Torné
Vitor Hugo Machioly

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.82921281011>

CAPÍTULO 12..... 127

PROPOSAL OF AN ELECTRONIC BRACELET DEVICE FOR THE MEASUREMENT OF VITAL SIGNS

Eliel Eduardo Montijo-Valenzuela

Elvis Osiel Covarrubias-Burgos

Darío Soto-Patrón

Esthela Fernanda Torres-Amavizca

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.82921281012>

SOBRE OS ORGANIZADORES 137

CAPÍTULO 4

A-CAES (ADIABATIC COMPRESSOR AIR ENERGY STORAGE): APARATO EXPERIMENTAL EM ESCALA LABORATORIAL

Data de aceite: 01/10/2021

Data de Submissão: 20/08/2021

Roberto Sihnel

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR/Ponta Grossa
<http://lattes.cnpq.br/5500152704240470>

Thiago Antonini Alves

Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR/Ponta Grossa
<http://lattes.cnpq.br/0763708094190677>

RESUMO: Nos países desenvolvidos a demanda de energia *per capita* tende a ser muito superior daqueles que possuem um modelo econômico ineficiente. Também é fato que a energia vem sendo consumida em maior quantidade com o passar do tempo. Encaixando-se sob a forma de armazenamento de energia potencial, o armazenamento de energia por compressão de ar de forma adiabática – A-CAES (do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage*) pode funcionar como regulador de sistemas de energia elétrica gerada por sistemas renováveis ou instáveis e torná-la disponível no local e na hora adequada de utilização, sem precisar enviá-la para a rede de distribuição, que pode estar indisponível ou inapta para recebê-la. Existem algumas plantas industriais feitas no mundo, sendo a de Huntorf na Alemanha (início em 1978) uma das principais elencadas pelo seu pioneirismo. Muitas utilizam o conceito de compressão estagiada por turbo-máquinas de grande porte e geração com o

mesmo equipamento. As utilizações são um pouco diferentes, porém visam garantir o fornecimento contínuo e estável de energia. Este trabalho visa a apresentar um protótipo laboratorial concebido e construído na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa, para estudo da eficiência do A-CAES em microsistemas, com extensão de resultados para concepções de diversos portes.

PALAVRAS-CHAVE: A-CAES, Energia, Armazenamento, Huntorf, Ar Comprimido, Cavernas, Renovável.

A-CAES (ADIABATIC COMPRESSOR AIR ENERGY STORAGE): EXPERIMENTAL EQUIPMENT ON LABORATORY SCALE

ABSTRACT: In developed countries, the demand for energy per capita tends to be much higher than those with an inefficient economic model. It is also a fact that energy has been consumed in greater quantity over time. Fitting in the form of potential energy storage, adiabatic air compression energy storage (A-CAES) can function as a regulator for electrical power systems generated by renewable or unfit systems and make it available on-site and at the appropriate time of use, without having to send it to the distribution network, which may be unavailable or unfit to receive it. There are some industrial plants made in the world, the Huntorf plant in Germany (beginning in 1978) one of the main ones listed for its pioneering. Many use the concept of compression aged by large turbo-machines and generation with the same equipment. The uses are somewhat different, but aim to ensure the continuous and stable supply of energy. This work aims to present a laboratory prototype designed

and built in UTFPR/Ponta Grossa to study the efficiency of A-CAES in micro-systems, with extension of results for conceptions of various sizes.

KEYWORDS: A-CAES, Energy, Storage, Huntorf, Compressed Air, Caves, Renewable.

1 | INTRODUÇÃO

Há um crescente aumento de consumo e geração de energia a nível mundial, especialmente após a passagem do milênio. Além disso, é um desafio permanente ter energia para utilização no tempo exato da necessidade. Conforme Castellões (2016), as formas mais comuns de armazenagem não são tão amistosas ecologicamente e todas possuem delimitações de uso no seu tamanho físico e aplicação – Figura 1. O sistema de armazenagem através da energia potencial hidráulica de um rio promove a inundação de áreas de mata, deslocamentos de pessoas, alterações de biomas, não obstante seja bastante utilizado, especialmente no Brasil onde as hidrelétricas usam esta funcionalidade para gerar e ter o sistema sempre disponível. Os sistemas de armazenagem através da energia química são muito densos em termo de energia, porém limitados em quantidade, tamanho e geração de resíduos sólidos potencialmente perigosos ao meio ambiente. E também, há direções de utilização de energias renováveis e de geração distribuída de energia, de forma mundial, assim, em pouco tempo, haverá diversos sistemas médios que necessitarão de reguladores de energia, mantendo-se o sistema estável. Dessa forma, será possível retornar energia ao sistema produtivo quando houver uma diminuição no rendimento, ou mesmo, reinserir toda a energia durante um intervalo onde não haja produção nenhuma. Exemplos disso podem ocorrer em falta de ventos ou à noite nos sistemas fotovoltaicos de energia solar (Ramadan *et al.*, 2016). Com o aumento de produção de energia solar, uma cidade de médio porte poderá incentivar a produção através de sistemas renováveis fotovoltaicos ou eólicos, independentemente da rede de distribuição, que possam ser usados durante o dia ou horário e estabelecimento de mecanismos estabilizadores de produção, como armazenagem em grande reservatório de ar comprimido. Com isso, cumpre-se a evolução técnica eco ambiental de produção de energia de uma forma mais prática para a geração distribuída (Ibrahim *et al.*, 2015).

Espectro de Aplicações e Tecnologias de Armazenamento de Energia Elétrica

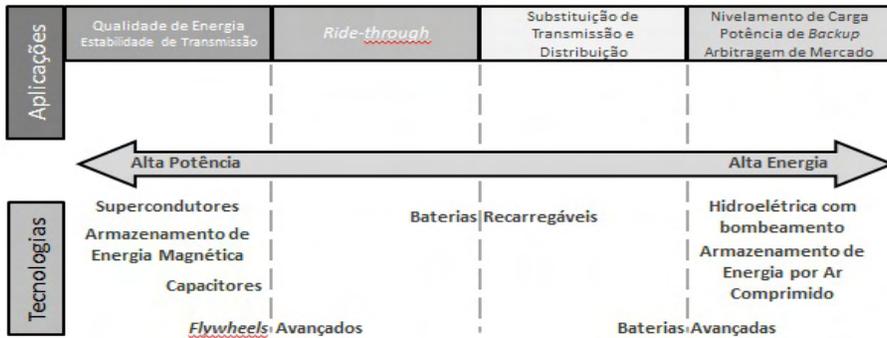


Figura 1. Espectro de aplicações e tecnologias de armazenamento de energia elétrica (Castelloes, 2016)

A energia elétrica armazenada sob a forma potencial de pressão de ar comprimido poderá ser transformada em energia elétrica em turbinas eólicas de alto rendimento, em uma planta térmica de compressão e de transmissão (Milewski *et al.*, 2016). A formação do Regulador Hidráulico Operacional (RHO) pode ser dividida em diversos vasos de pressão ou em um grande vaso único de pressão subterrâneo, chamado de reservatório apenas. Com isso, poder-se-á estudar novos formatos mais compactos de turbinas aerodinâmicas impulsionadas por ar comprimido, com a vantagem de não emissão ainda de gases poluentes ou residuais de combustão (Hammann *et al.*, 2017). Também o sistema poderá ser estendido a dois tipos de porte: médio e micro. Os sistemas de médio porte como mencionados poderão abastecer boa parte de uma cidade em regime noturno, por exemplo. Enquanto os sistemas de micro porte poderão atender locais onde não possa haver perdas ou interrupções de fornecimento de energia, como hospitais. Também poderão ser utilizados em horários de pico, diminuindo os custos com energia elétrica e também com combustíveis utilizados em geradores térmicos que tem a finalidade de cobrir estes horários de alto valor financeiro da energia elétrica (Diyoke *et al.*, 2018). Há de se reconhecer que existem fatores limitantes, como por exemplo, que a produção deverá ser superior ao consumo, de tal forma que haja estocagem para uso no período adequado.

Nesse contexto, estudar o Armazenamento de Energia em Ar Comprimido de Forma Adiabática – A-CAES (do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage*) como forma para armazenamento de energia renovável proveniente de fontes solares para disponibilizá-la nos horários noturnos ou de baixa captação de radiação solar, de forma a estabelecer um regulador, é de extrema importância.

2 | METODOLOGIA

Este artigo está aderente à temática de Engenharia Mecânica e de Energia como linhas de pesquisa, utilizando às Ciências Térmicas (Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Transferência de Calor), a Eletricidade, os motores e geradores elétricos concomitantemente as áreas de Energias Renováveis (Crawley, 2017). Tratam-se de grandes áreas aglutinadoras que resultam em um projeto de pesquisa com objetivos específicos para atuação na área de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido de Forma Adiabática (A-CAES). Por meio de uma pesquisa bibliográfica de artigos científicos em importantes bases de dados científicas, foi realizada uma revisão bibliográfica para estabelecimento dos fundamentos científicos visando ao projeto do aparato experimental em escala laboratorial. Para formulação dos cálculos específicos do sistema A-CAES, a metodologia empregada consistiu em informações técnicas de livros próprios do tema (Rollins, 2004; Rosa, 2015; Crawley, 2017; Moreira, 2017). Sistemas experimentais, como por exemplo, os utilizados em Budt *et al.* (2016), Wang *et al.* (2017) e Castellani *et al.* (2018) analisados com objetivo de estabelecer o nível mínimo de atendimento das expectativas com relação ao projeto executivo e instalação do aparato experimental em escala reduzida no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) vinculado ao Programa de Pós Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

3 | DESCRIÇÃO GERAL DOS SISTEMAS CAES E A-CAES

De acordo com Jafarizadeh *et al.* (2020) é improvável fazer um estudo relacionado ao CAES sem elencar a Planta Térmica de *Huntorf*, localizada na Alemanha. Concebida para regularizar a rede de energia elétrica proveniente de usinas eólicas localizadas no Norte daquele país, foi a primeira a entrar em operação comercial, no ano de 1978. Trata-se de um sistema onde se armazena energia pneumática potencial em cavernas salinas subterrâneas, com volume aproximado de 310.000m³. Essa planta tem 290MW de potência e opera segundo um ciclo diário (Kaldemeyer *et al.*, 2016). As principais características operacionais dessa planta estão apresentadas na Tabela 1. Esse sistema tem sido aperfeiçoado desde a sua inauguração e os resultados simulados relatados na literatura dão conta de um rendimento global de 42% (Luo *et al.*, 2015).

Os novos sistemas propostos encontrados na literatura, fazem a consideração da possibilidade de recuperação de calor gerado durante o ciclo de compressão e utilização no processo de expansão das turbinas. Essa energia térmica gerada pelo processo de compressão é captada por um sistema simples composto por trocadores de calor (*Heat Exchangers* ou HEXs), armazenada em uma planta térmica (TES – *Thermal Energy Storage*) composta por um reservatório quente e outro frio, basicamente (Chen *et al.*, 2017). O ar é armazenado a baixa temperatura e expande a alta temperatura, recebendo calor dos trocadores de calor. Normalmente o fluido de trabalho selecionado do TES é a água. A composição do sistema

CAES com o TES é chamado de A-CAES (do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage* ou, em português, Armazenamento de Energia por Compressão de Ar de Forma Adiabática). Isto quer dizer que somente o fluido de trabalho do TES e o Ar estão envolvidos no sistema (Luo *et al.*, 2015). Não há queima de combustível (Gás Natural ou GLP ou outro) envolvido no sistema mostrado topologicamente na Figura 2.

Item	Denominação	Valor	Unidade
Compressores: linhas de baixa e alta pressão (conexão em série)			
01	Vazão mássica de ar dos Compressores	108	kg/s
02	Potência de todos compressores	60	MW
03	Temperatura de saída do ar do after cooler	50	°C
04	Máxima de Ar de saída do after cooler	72	kgf/cm ²
Cavernas: dois reservatórios subterrâneos			
05	Volume total (físico) das cavernas (aproximado)	310.000	m ³
06	Faixa de temperatura das paredes das cavernas	40 a 50	°C
07	Pressão operacional dos reservatórios	43 a 66	kgf/cm ²
08	Pressão máxima admissível	70	kgf/cm ²
09	Queda de pressão operacional	10 a 15	kgf/cm ²
Turbinas: linhas de alta e baixa pressão (conexão em série)			
10	Vazão mássica de gás nas turbinas	417	kg/s
11	Potência de todas as turbinas	290	MW
12	Pressão de entrada na turbina de alta pressão	43	kgf/cm ²
13	Pressão de entrada na turbina de baixa pressão	8 a 11	kgf/cm ²
14	Razão temporal de carga/descarga de todo sistema	4	-

Tabela 1. Especificações básicas da Planta Huntorf/Alemanha (Luo *et al.*, 2015).

O funcionamento básico desse sistema considerando as especificações da Planta *Huntfor/ALE* é: a rede elétrica instável é conectada ao sistema CAES e gerida pelo Operador Elétrico, que controla a entrada e saída de energia para o chamado *grid on*, ou seja, o operador é que verifica e gera as demandas necessárias ao CAES. No Sistema de Compressão o Ar é admitido a pressão atmosférica pelo Compressor 01 (BP – Baixa Pressão) e é impelido para outros compressores em série denominados *boosters* (AP – Alta Pressão) que elevam a pressão do ar a aproximadamente 72kgf/cm², conduzindo o ar até o Reservatório de Ar Comprimido. Durante os estágios de compressão a entalpia, a pressão e a temperatura do ar vão se elevando. Em cada estágio há um trocador de calor que refrigera o ar, recebendo calor do mesmo e transmitindo ao fluido de trabalho (geralmente água). A temperatura máxima de saída no último estágio de compressão, do ar, é de aproximadamente 163°C e a mínima após o último estágio de expansão (turbinas) é de aproximadamente 101°C. A temperatura da água nos reservatórios quente e frio são 109°C e 69°C, respectivamente.

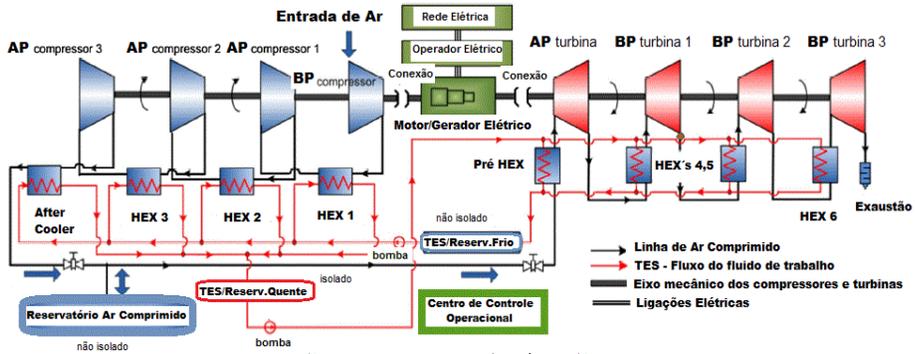


Figura 2. Desenho esquemático de um sistema A-CAES (adaptado de Luo et al. (2015)).

A água armazenada no reservatório quente provém dos trocadores de calor e *after coolers* instalados nos estágios de compressão. Esse reservatório fica isolado visando evitar perdas térmicas. Esse fluido quente é bombeado para as turbinas onde há trocadores de calor em cada estágio de expansão do ar comprimido, com a finalidade de aumentar a temperatura do ar, entregando calor ao mesmo e retornando ao reservatório frio. A variação média de temperatura entre frio e quente é de 40°C. O reservatório frio não é isolado, bem como o Reservatório de Ar Comprimido. A finalidade do TES (sistema composto por trocadores, reservatórios frio e quente e sistema de bombeamento) é evitar a perda de calor através do Reservatório de Ar Comprimido. De forma lógica, o Reservatório de Ar Comprimido poderia ficar a alta temperatura se não houvesse o sistema de trocas de calor, porém, devido às dimensões e irregularidades nas paredes do mesmo é praticamente inviável acontecer o isolamento térmico do mesmo (cavernas de grandes dimensões). Dessa forma, esse calor que seria perdido é “recuperado” e aproveitado no aumento da entalpia na saída do sistema de expansão (turbinas). A temperatura das cavernas é em torno de 50°C. A Planta *Huntorf* tem funcionado segundo um ciclo de 8 horas de compressão e 2 horas de descarregamento (produção elétrica), pois uma avaliação mostrou que esse ciclo diário apresentaria os melhores resultados.

4 | BASE DE CÁLCULO DO SISTEMA A-CAES

O local de instalação do aparato experimental é a cidade Ponta Grossa no estado do Paraná no Brasil com Latitude Sul de 25°4'8", Longitude Oeste de 50°8'7" e com altitude de 954m do nível do mar. O projeto de armazenamento de energia através de ar comprimido de forma adiabática foi baseado na seleção de equipamentos de uso comercial, procurando-se o máximo rendimento global para uma bancada experimental de escala reduzida a ser instalada na edificação do Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) da UTFPR/Ponta Grossa. A Figura 3 mostra uma fotografia de parte da instalação do sistema

construído – Casa de Compressão e Geração. Os equipamentos básicos disponíveis para a montagem experimental foram:

- 01 compressor *Chiaperini*TM CJ15 duplo estágio, 176 psi, 424 l/min, 2,2 kW / 1100 RPM;
- 01 motor de palhetas (turbina) *Kazi*TM – KZA750 7,5 HP, 80 l/s, 17 N.m;
- 01 alternador elétrico *Toyama*TM 3,5 kVA / 6 pontas / trifásico / $\cos \varphi = 0,80$, $\eta = 63\%$, 1800 rpm;
- 01 reservatório de ar comprimido 12 bar, 200 litros, horizontal acoplado ao compressor (APV200);
- 01 Conjunto de painéis fotovoltaicos 5,6 kW-p / com inversor 220 V/ trifásico.

5 | PROJETO AS BUILT

Executados os cálculos teóricos fundamentais para início do projeto de um sistema experimental A-CAES em escala laboratorial, os esforços foram direcionados para cálculos finais seletivos de equipamentos comerciais para instalação de um sistema compatível.



Figura 3. Casa de Compressão e Geração: compressor, reservatório, turbina, alternador elétrico, sistema pneumático de controle, válvula elétrica, válvula, registro, regulador e lubrificador.

5.1 Seleção dos Painéis Fotovoltaicos

Para viabilizar de forma cabal a captação através de uma fonte de energia renovável foi executada a seleção dos painéis fotovoltaicos. Para a captação fotovoltaica foram montados dois *grids*, sendo 10 painéis fotovoltaicos *Yingli Energy*TM de 150W e 24 painéis fotovoltaicos *Upsolar*TM de 170W, perfazendo 5,58 kWp, podendo atender a carga solicitada pelo compressor. Esses 34 painéis fotovoltaicos foram instalados no telhado da edificação do

LabMPEE/UTFPR (Figura 4). A seleção prévia foi realizada pelo *software shareware PVSYSY* V6.84 (Pereira & Oliveira, 2015). Esses cálculos estão nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Stand alone system: Parâmetros de Simulação				
Projeto:	Sistema Mini A-CAES Laboratorial – LabMPEE/UTFPR/Ponta Grossa			
Modulo FV	Si-poly	Modelo	Poly 110 Wp	72 células
Utilização: 5 dias/semana	Quantidade: 01	Potência: 2200 W	Utilização: 6h/dia	13200 Wh/dia
Compressor pneumático	Trifásico	220 V	Standby consumer	24 Wh/dia

Tabela 2. Simulação fotovoltaica para seleção dos painéis fotovoltaicos (exigência do consumidor).

Projeto: Sistema Mini A-CAES Laboratorial UTFPR/Ponta Grossa				
Localização Geográfica	Ponta Grossa		País	Brasil
Localização	Latitude	-25.09° S	Longitude	-50.16 W
Tempo definido como	Tempo legal	Fuso Horário TU-03	Altitude	954 m
Variante da Simulação	SIM04	Data da Simulação	15/10/2019	21h34min
Modelos utilizados	Transposição	Perez	Difuso	Perez, Meteororm
Exigências do consumidor	Consumo doméstico		Constantes ao longo do ano	
Características do Grupo Fotovoltaico				
Modulo FV	Si-poly	Modelo	Poly 110 Wp	72 cells
Número de módulos FV	Em série	2 módulos	Em paralelo	23 strings
Número total de módulos	Número de módulos	46	Potência Unitária	110 Wp
Potência global do grupo	Nominal (STC)	5.06 kWp	Operacionais	4501 Wp (50 °C)
Caract. Oper. (50 °C)	Umpp	62 V	I mpp	73 A
Superfície total	Módulos	41,3 m ²	Célula	36,4 m ²

Tabela 3. Simulação fotovoltaica para seleção dos painéis fotovoltaicos (características).

Projeto:	Sistema Mini A-CAES Laboratorial – LabMPEE/UTFPR/Ponta Grossa			
Produção do sistema	Energia disponível	6181 kW-h/ano	Produção Específica	1221 kW-h/kWp/ano
	Energia utilizada	3451 kW-h/ano	Excedente	2337 kW-h / ano
	Performance	42,37%	Fração Solar	99,99%

Tabela 4. Simulação fotovoltaica para seleção dos painéis fotovoltaicos (resultados principais da simulação).

Característica Técnica	Yingli Energy™ (China)	Upsolar™ (EUA)
Modelo do painel	YL150P-17H	UP-M170P
Potência nominal	150.0 W ($\pm 5\%$)	170.0 W ($\pm 3\%$)
Corrente nominal	8,12 A	8,88 A
Proteção (fusível ou disjuntor)	15 A	15 A
Corrente de circuito aberto	22,90 A	24,40 A
Corrente de curto circuito	8,61 A	9,10 A
Tensão máxima do sistema	600 V	1000 V
Área externa do módulo (m ²)	1,00	0,99
Quantidade	10 painéis	24 painéis

Tabela 5. Características dos painéis fotovoltaicos selecionados



Figura 4. Conjunto de painéis fotovoltaicos do sistema A-CAES

5.2 Sistema Elétrico

O projeto de painel elétrico com gabinete e componentes visa o controle, medição e armazenamento de dados de sistema de cogeração elétrica e do sistema fotovoltaico, procurando-se à aquisição de dados da bancada experimental instalada. Como mencionado anteriormente, a potência geral instalada foi de 5,58 kW elétricos. Esse sistema elétrico é composto basicamente por:

- a. Um gabinete em aço, uso interno IP21, com porta com fecho triangular, com assentamento em base de alvenaria, placa de fundo, barramento em cobre eletrolítico e sistema de identificação de circuitos e componentes;
- b. Componentes assentados em trilhos DIN, fiações compatíveis, anilhas identi-

ficadoras em cada cabo, cabos coloridos segundo o padrão ABNT, cabos de força, disjuntor para compressor (2,2 kW / 220 V/ trifásico) e para sistema de cogeração elétrica (3,5 kVA / 220/127V) e disjuntor geral de seccionamento (6,0 kW) (Figura 5);

- c. CLP para controle lógico do sistema e Inversor Solar 6,0 kWp – trifásico (220V) integrados (Figura 5);
- d. Botoeiras liga/desliga, lâmpadas de sinalização;
- e. Contactoras e sistema de controle da válvula elétrica proporcional 1”;
- f. Sistema QDCC com *String* e *Combiner Box* (forma de montagem) (Figura 6).

Essa contabilização de energia produzida pela carga demandada pelo motor do compressor ocorre no inversor solar. Parando-se o motor, um sinal é enviado pelas portas de comunicação com o CLP, computando e armazenando a energia produzida neste período de funcionamento. A contabilização da energia pneumática (potencial) ocorre através da curva de pressão, cujo sinal é gerenciado por um sensor de pressão *IFM™* e pelo tempo de abertura da válvula elétrica. A válvula abre com 9,0bar de pressão na linha e fecha com 4,0bar de pressão na linha. As pressões foram estabelecidas conforme o projeto pneumático da turbina, de tal forma que se tenha a rotação de 1800 RPM na mesma, vencendo-se o torque necessário para girar o alternador elétrico. Com a geração elétrica pelo alternador, um conjunto de resistências elétricas (3x 700W) dissipam a produção elétrica – Figura 8.

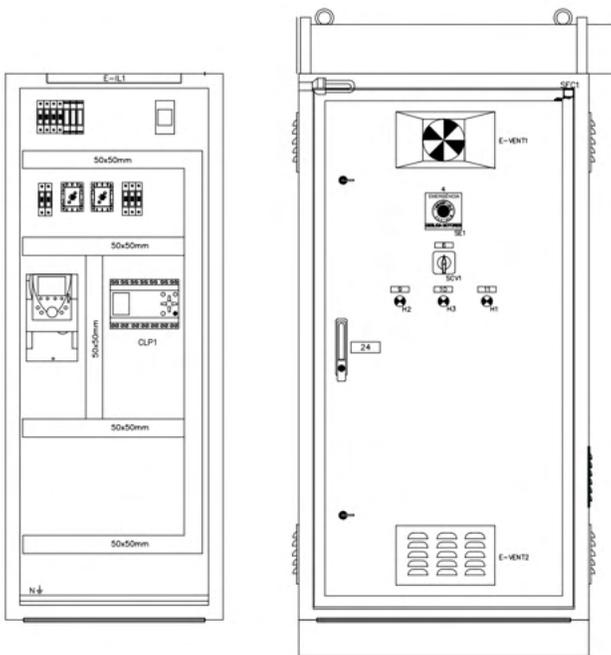


Figura 5. Quadro de comando com gabinete

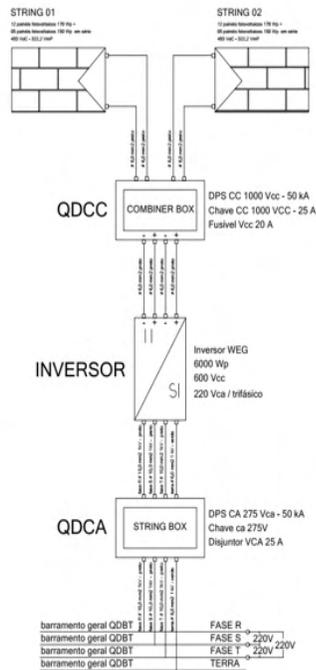


Figura 6. Croqui elétrico de geração fotovoltaica



Figura 7. Inversor WEG™ e CLP WEG™



Figura 8. Banco de resistências elétricas

5.3 Sistema de Compressão e Cogeração Elétrica

O sistema de tratamento/fluxo/compressão de ar atmosférico e o sistema de cogeração elétrica foram instalados em um abrigo de alvenaria anexo às instalações internas do LabMPEE/UTFPR/Ponta Grossa conforme apresentado anteriormente na Figura 3. A interligação entre os sistemas é feita por tubulação executada em tubos de aço conforme

DIN2448. Como mencionado anteriormente, o sistema é composto por compressor recíproco, com refrigeração dos cabeçotes de admissão e descarga, pistões e sistemas mecânicos completos com válvulas. Esse é acoplado diretamente ao motor elétrico trifásico, 220V, de 3HP de potência máxima. Reservatório 200 litros, pressão máxima admissível 12,0bar. O sistema de cogeração é composto por sistema abaixador de pressão por fluxo pneumático, que consumirá 80/s de a 4,0bar, produzindo 17N.m de torque e 7,5CV de potência no eixo, de tal forma que o mesmo gire a 1800RPM sincronamente para acoplamento a sistema alternador monofásico 220/127V, seis pontas, com acoplamento direto. Ambos equipamentos foram assentados em base metálica construída para nivelamento e alinhamento dos mesmos conjuntos girantes e interligados pneumaticamente e eletricamente com os demais sistemas (Figura 3). O acoplamento do sistema de turbina e gerador ocorre através de um elemento elástico, acoplamento tipo flexível. A turbina recebe ar proveniente do reservatório do compressor, que está a 12bar de pressão, este ar passa pelo lubrificador e regulador de pressão e é liberado a 9,0bar sobre a válvula elétrica. Com a pressão e o fluxo, esta energia potencial atinge as palhetas da turbina, fazendo-a girar acima do torque inercial do alternador. A ação da turbina sobre o gerador excita-o, produzindo energia elétrica. Quando a pressão, lida pelo sensor de pressão, atinge o mínimo de 4,0bar, a válvula elétrica é fechada pelo CLP.

6 | RESULTADOS PRELIMINARES & DISCUSSÃO

Os testes experimentais preliminares foram executados no mês de outubro de 2020, onde se encontrava na maioria das vezes dias ensolarados com incidência solar acentuada. As condições ambientais eram de pouco vento, pela manhã entre 10h e 12h. A coleta de informações ocorreu de forma automática, conforme previsto e foi disponibilizada em planilhas, sendo compilados os resultados preliminares nas Tabelas 6 e 7. A abertura da válvula elétrica foi de 65% do curso permitido. A rotação síncrona foi estabelecida sem problemas, apenas fazendo-se o *setup* no CLP. O resultado experimental para a eficiência global do sistema

Item	Energia [kW-h]	Eficiência Energética
Painel	0,1501	-
Motor Elétrico	0,1174	78%
Compressão	0,0374	32%
Gerador Elétrico	0,0272	73%
Sistema Global	-	18%

Tabela 6. Eficiência energética experimental por fase do processo A-CAES

Tempo	Potência Média Inversor [kW]	Energia Painéis Solares [kW-h]	Corrente [A]	Potência Compressor [kW]	Energia Compressor [kW-h]	Tempo Geração [s]	Energia Gerada [kW-h]	Energia Potencial [kW-h]
00:02:22	3,0099	0,12	8,4	2,98	0,12	27	0,0263	0,0383
00:03:47	2,9718	0,19	7,5	2,66	0,17	34	0,0331	0,0292
00:03:40	2,9337	0,18	7,0	2,48	0,15	28	0,0272	0,0337
00:03:42	2,9337	0,18	6,4	2,27	0,14	29	0,0282	0,0412
00:03:03	2,9528	0,15	5,6	1,98	0,10	31	0,0301	0,0286
Eficiência Média Total							18%	

Tabela 7. Resultados preliminares experimentais de produção energética do sistema A-CAES

A-CAES foi de 18% enquanto que o valor teórico da eficiência foi calculada previamente em 16% (Elmegaard & Markussen, 2011). Outra discussão sobre esses resultados preliminares pode ser feita em relação à eficiência de compressão de apenas 32%. Isso se deve principalmente na escolha comercial de um compressor recíproco mais simples e na forma de armazenamento (reservatório acoplado ao compressor de apenas 200 litros). Ressalta-se ainda, que os equipamentos usados na Alemanha e nos EUA são de portes diferentes e construções diferentes, tipo turbo gerador, onde é obtida uma eficiência maior e pressões cerca de 6 vezes maiores que a utilizada nessa bancada experimental (Budt *et al.*, 2016). Além disso, os sistemas são integrados com ciclos térmicos com uso de combustível fóssil. Em comparação com os volumes armazenados de 310.000m³ às pressões da ordem 72bar, muitas variáveis presentes nas irreversibilidades se encontram com maior nível de importância no aparato experimental. Mesmo assim, o sistema experimental apresentado se mostrou controlável com um sistema simples de CLP e poucos sensores.

7 | CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado um aparato experimental em escala laboratorial concebido e construído na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa, para estudo experimental da eficiência do Armazenamento de Energia em Ar Comprimido na Forma Adiabática – A-CAES (do inglês, *Adiabatic Compressor Air Energy Storage*) como forma de armazenamento de energia renovável proveniente de fontes solares para disponibilizá-la nos horários noturnos ou de baixa captação de radiação solar, de forma a estabelecer um regulador. A validação prática experimental do mini sistema A-CAES aconteceu de forma comprobatória neste experimento, usando-se de energia renovável, sem uso de combustíveis fósseis, sem geração de resíduos sólidos, cumprindo com seus objetivos principais de estabilização da geração da energia elétrica e de armazenamento ecologicamente orientado de energia potencial.

REFERÊNCIAS

Budt, M., Wolf, D., Span, R., Yan, J., 2016. “**A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments**”. *Applied Energy*, Vol. 170, p. 250-268.

Castellani, B., Morini, E., Nastasi, B., Nicolini, A., Rossi, F., 2018. “**Small-scale compressed air energy storage application for renewable energy integration in a listed building**”. *Energies*, Vol. 11, #1921.

Castelloes, F.V., 2016. *Petrobras e P&D em armazenamento de energia. Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação “Leopoldo Américo Miguez de Mello” (CENPES)*, Rio de Janeiro, Brasil.

Chen, X., Song, J., Liang, L., Si, Y., Wang, S., Xue, X., 2017. “**Performance study of salt cavern air storage based non-supplementary fired compressed air energy storage system**” In *Proceeding of the 2017 International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering - ICSMME 2017*. Seoul, South Korea.

Crawley, G.M., 2017. *Energy Storage*. World Scientific, New Jersey.

Diyoke, C., Aneke, M., Wang, M., Wu, C., 2018. “**Techno-economic analysis of wind power integrated with both compressed air energy storage (CAES) and biomass gasification energy storage (BGES) for power generation**”. *RSC Advances*, Vol. 8, p. 22004-22022.

Elmegaard, B., Markussen, W.B., 2011. “**Efficiency of compressed air energy storage**”. In *Proceedings of the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems ECOS 2011*. Novi Sad, Serbia.

Hammann, E., Madlener, R., Hilgers, C., 2017. “**Economic feasibility of compressed air energy storage system under market uncertainty: a real options approach**”. *Energy Procedia*, Vol. 105, p. 3798-3805.

Ibrahim, H., Belmokhtar, K., Ghandour, M., 2015. “**Investigation of usage of compressed air energy storage for power generation system improving - application in a microgrid integrating wind energy**”. *Energy Procedia*, Vol. 73, 305-316.

Jafarizadeh, H., Soltani, M., Nathwani, J., 2020. “**Assessment of the Huntorf compressed air energy storage plant performance under enhanced modifications**”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 209, #112662.

Kaldemeyer, C., Boysen, C., Tuschy, I., 2016. “**Compressed air energy storage in the German energy system - status quo & perspectives**”. *Energy Procedia*, Vol. 99, p. 298-313.

Luo, X., Wang, J., Krupke, C., Wang, Y., Sheng, Y., Li, J., Xu, Y., Wang, D., Miao, S., Chen, H., 2015. “**Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale adiabatic compressed air energy storage systems with low-temperature thermal storage**”. *Applied Energy*, Vol. 162, p. 589-600.

Milewski, J., Badyda, K., Szablowski, L., 2016. “**Compressed air energy storage systems**”. *Journal of Power Technologies*, Vol. 96, p. 245-260.

Moreira, J.R.S., 2017. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. LTC, Rio de Janeiro.

Pereira, F.A.S., Oliveira, M.A.S., 2015. **Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica**. Publindústria Edições Técnicas, Porto.

Ramadan, O., Omer, S., Jradi, M., Sabir, H., Riffat, S., 2016. “**Analisis of compressed air energy storage for large-scale wind energy in Suez, Egypt**”. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 11, p. 476-488.

Rollins, J.P., 2004. **Manual de Ar Comprimido e Gases**. Prentice-Hall, São Paulo.

Rosa, A.V., 2015. **Processos de Energias Renováveis**. LTC, Rio de Janeiro.

Wang, J., Lu, K., Ma, L., Wang, J., Dooner, M., Miao, S., Li, J., Wang, D., 2017. “**Overview of compressed air energy storage and technology development**”. *Energies*, Vol. 10, #991.

ÍNDICE REMISSIVO

A

A-CAES 5, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48

Aerodinâmica 68, 69

Ar comprimido 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 48, 50

Armazenamento 36, 38, 39, 40, 41, 44, 48, 49

B

Biomecânica 88

C

Cavernas 36, 39, 40, 41

Células de inovação 127

Ciência de dados 1

Confiabilidade 113, 115, 121

Consumo de combustível 1, 8, 10

D

Desenvolvimento sustentável 1, 2

E

Eletrólise 8, 9, 10, 11, 14, 18

Eletrólitos 5, 8, 9, 14, 17, 18

Energia 3, 8, 9, 11, 17, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 68, 70, 90

Energia limpa 8, 9

F

Fluidodinâmica computacional 68

Fluido incompressível 68

Fratura coronal 88, 89, 99

G

Geração de hidrogênio 8, 9, 10, 11, 17

H

Huntorf 36, 37, 39, 40, 41, 49

M

Medição de sinais vitais 127

Método dos elementos finitos 6, 88, 90, 98

Metodologia seis sigma 6, 113

O

Ortotrópico 88, 89, 92, 96, 97, 98

P

Paradas não planejadas 113, 114, 118, 119, 120, 122, 124, 125

Perdas metálicas 113

Pulseira eletrônica 127

R

Renovável 36, 38, 42, 48

Router CNC 68, 69, 70

S

Setor automotivo 5, 1, 2, 3, 7

Sistema remoto 127

T

Tipos de água 5, 8, 10, 11, 12, 17

Túnel de vento 6, 68, 70, 71, 74, 78

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA 2



🌐 www.atenaeditora.com.br
✉ contato@atenaeditora.com.br
📷 @atenaeditora
📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA 2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br