

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 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 Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

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 Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
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
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
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



Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0400-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.002221708>

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

CDD 621.3

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



Atena
Editora
Ano 2022

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 elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro electricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de subáreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

APLICAÇÃO DO NIÓBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Claudinei Guilherme Hoffmann

Luciana Paro Scarin Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217081>

CAPÍTULO 2..... 14

FORECAST METHOD FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES: A CASE STUDY OF THE ONTARIO'S ELECTRICAL SYSTEM

Bruno Knevez Hammerschmitt

Felipe Cirolini Lucchese

Marcelo Bruno Capeletti

Renato Grethe Negri

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva

Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217082>

CAPÍTULO 3..... 28

IDENTIFICADOR DE FALHAS PARA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BASEADO EM SUPPORT VECTOR MACHINE IMPLEMENTADO EM CLOUD

Jacyeude de Moraes Passos Araujo Segundo

Carlos Vinicius Alves Coimbra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217083>

CAPÍTULO 4..... 41

DETECÇÃO DE AVARIAS EM ISOLADORES DE POTÊNCIA: UMA PESQUISA DA LITERATURA CORRELATA À UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES

Ivan Nunes da Silva

Beatriz de Lima Tavares

Sofia Moreira de Andrade Lopes

Danilo Hernane Spatti

Rogério Andrade Flauzino

Victor Hideki Yoshizumi

Ana Cláudia Carvalho Barquete

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217084>

CAPÍTULO 5..... 56

LEITURA DE PARÂMENTOS DE MOVIMENTO DE UM PÊNDULO RÍGIDO CONTÍNUO UTILIZANDO SENSOR DE EFEITO HALL

Getúlio Teruo Tateoki

Jackson Tsukada

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217085>

CAPÍTULO 6..... 65

PANELES FOTOVOLTAICOS ADICIONALES A COLECTORES PARABÓLICOS PARA UN SISTEMA AUTÓNOMO DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR EN ZONAS TROPICALES

Rosenberg J Romero
Yuridiana Rocio Galindo Luna
Jesús Cerezo Román
Moisés Montiel González

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217086>

CAPÍTULO 7..... 94

UM MODELO HÍBRIDO DE BUSCA HARMÔNICA E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADO NO PROJETO DO CONTROLADOR LQR

Luis B. P. Nascimento
Vandilberto P. Pinto
Márcio A. B. Amora
Rômulo N. C. Almeida

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217087>

CAPÍTULO 8..... 108

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS FABRICANTE EPSON

Bruno Suracci de Lima
Flávio Luiz Rossini
João Henrique Dias Corrêa
João Marcos Pericaro Lopes
Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa
Yuri Ruzzene Barroso

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217088>

CAPÍTULO 9..... 126

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA SOB A FORMA DE HIDROGÊNIO (SAEEH₂) INSTALADO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA UTILIZANDO O SOFTWARE HOMER

Juarez Corrêa Furtado Júnior
Ennio Peres da Silva
Vitor Feitosa Riedel
Ana Beatriz Barros Souza
Hélio Nunes de Souza Filho
Demóstenes Barbosa da Silva
Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa
Thiago Dias Alencar Ferreira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217089>

SOBRE OS ORGANIZADORES 138

ÍNDICE REMISSIVO..... 139

APLICAÇÃO DO NIÓBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍCIO

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 30/06/2022

Claudinei Guilherme Hoffmann

Faculdade Uniamérica Descomplica
Foz do Iguaçu – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/2714051820206721>

Luciana Paro Scarin Freitas

Faculdade Uniamérica Descomplica
Foz do Iguaçu – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/2554057558293125>

RESUMO: O nióbio, descoberto em 1801, mas que foi utilizado somente no século XX, devido a necessidade de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais. A aplicação do nióbio à metais confere características como: condutividade térmica e elétrica; maleabilidade; ductilidade; alta resistência ao calor, corrosão e ao desgaste. O armazenamento, com um papel cada vez maior na geração e no consumo de energia elétrica, aprimora cada vez mais as baterias de íons de lítio para carros elétricos. O uso de materiais desenvolvidos com o nióbio permite a geração de baterias mais seguras, de carregamento rápido, com maior vida útil. O nióbio não substituirá o lítio, mas sim outros metais com propriedades parecidas como o níquel e o cobalto. Os estudos objetivam o desenvolvimento de ânodos e cátodos das baterias com aplicação do óxido de nióbio (Nb_2O_5). Nos materiais do ânodo, lado negativo da bateria que sofre oxidação, proporciona alta capacidade

volumétrica, boa ciclabilidade e performance, normalmente é feito de óxidos metálicos de grafite, titânio e tungstênio. Nos materiais do cátodo, lado positivo da bateria, é o componente que sofre redução, diminui a resistência elétrica, normalmente são feitos de óxidos metálicos de cobalto, ferro, manganês e níquel. Esta aplicação possibilita a comercialização de baterias mais estáveis. As principais vantagens da aplicação do nióbio em baterias são: maior tensão de operação, condutividade eletrônica e iônica, densidade energética e de potência, estabilidade química, vida útil maior e maior segurança. A bateria terá grau mínimo de risco de curto circuito e a maior condutividade térmica que diminui o aquecimento, permitindo maiores densidades de carga e diminuição do tempo de carga. Esse assunto é inovador, os estudos, materiais e publicações utilizados são bem atualizados.

PALAVRAS-CHAVE: Nióbio, bateria, ânodos, cátodos.

APPLICATION OF NIOBIUM IN LITHIUM ION BATTERIES

ABSTRACT: Niobium, discovered in 1801, but which was only used in the 20th century, due to the need to improve the mechanical properties of materials. The application of niobium to metals confers characteristics such as: thermal and electrical conductivity; malleability; ductility; high resistance to heat, corrosion and wear. Storage, with an ever-increasing role in the generation and consumption of electrical energy, increasingly improves lithium-ion batteries for electric cars. The use of materials developed with niobium allows the generation of safer, faster-charging

batteries with a longer useful life. Niobium will not replace lithium, but other metals with similar properties such as nickel and cobalt. The studies aim at the development of battery anodes and cathodes with application of niobium oxide (Nb_2O_5). In the anode materials, the negative side of the battery where the oxidation reaction occurs, provides high volumetric capacity, good cycling and performance, it is usually made of metallic oxides of graphite, titanium and tungsten. In the materials of the cathode, the positive side of the battery, is the component where the reduction reaction occurs, decreases electrical resistance, normally they are made of metallic oxides of cobalt, iron, manganese and nickel. The niobium application makes it possible to sell more stable batteries. The main advantages of applying niobium in batteries are: higher operating voltage, electronic and ionic conductivity, energy and power density, chemical stability, longer service life and greater safety. The battery will have a minimal degree of risk of short circuit and the highest thermal conductivity which decreases heating, allowing for higher charge densities and reduced charging time. This subject is innovative, the studies, materials and publications used are well updated.

KEYWORDS: Niobium, battery, anodes, cathodes.

1 | INTRODUÇÃO

Pelo aumento populacional e de todos os setores produtivos pelo mundo, a demanda pela energia elétrica vem aumentando nos últimos anos. Essa energia é gerada principalmente por fontes não renováveis que liberam gases poluentes, ocasionando problemas ambientais. Com a diminuição das reservas de petróleo e a oscilação do preço, está surgindo um interesse mundial em novas formas de geração de energia.

O Nióbio é um metal que foi descoberto em 1801 por um químico inglês, mas que ganhou relevância somente por volta do século XX. O início da utilização do nióbio, associado à indústria siderúrgica, surgiu da necessidade de melhorar as propriedades mecânicas, para a produção de automóveis, pontes, navios, na atividade de extração de petróleo, em grandes profundidades e com ambientes agressivos e, em desenvolvimento atualmente para a aplicação do nióbio em componentes eletrônicos e baterias.

Como destaca Badra (2022), a aplicação do nióbio confere ao metal a capacidade de melhorar as propriedades de materiais, tornando-os mais eficientes, apresentando características como:

- Alta condutividade térmica e elétrica;
- Maleabilidade;
- Ductilidade;
- Alta resistência ao calor;
- Alta resistência a corrosão;
- Alta resistência ao desgaste.

Dessa forma, o armazenamento de energia tem ocupado um papel importante na

geração e no consumo da energia elétrica. Baterias de íon de lítio vêm recebendo atenção devido a aplicação em carros elétricos.

A cada descoberta sobre a utilização do nióbio, faz com que mudamos nossa visão em relação a este metal e das tecnologias do futuro.

Setores onde há aplicação de nióbio, propiciando importante desenvolvimento tecnológico:

- Na mobilidade o nióbio tem um papel importante para a inovação e o desenvolvimento de materiais para diversas aplicações, mais resistentes, que proporcionem segurança, boa performance, eficiência e maior leveza, característica muito importante na concepção de veículos, melhora a autonomia, com menor consumo de energia.
- Na estrutural o nióbio ajuda a resolver complexos desafios de engenharia, permitindo redução de custos, e agregando eficiência aos materiais. Projetos com tecnologias modernas, permitem estruturas mais leves, compactas e ainda assim com maior segurança, devido à maior resistência e tenacidade.
- Na energia o uso de materiais desenvolvidos com o nióbio permite a geração e consumo de energia limpa, baterias mais seguras, de carregamento rápido, com maior vida útil, e de soluções de armazenamento mais eficientes.

2 | REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estudo de referências baseadas em tecnologias com nióbio

Este trabalho destaca os principais métodos, conceitos e tecnologias utilizados por alguns pesquisadores, no desenvolvimento de seus conceitos.

Em seu trabalho, Xin et al. (2019), os autores comentam que na tecnologia das principais baterias utilizadas atualmente, encontramos nos cátodos os óxidos com alto teor de níquel nas camadas, que apresentam um bom resultado, com alto fluxo de densidade de energia. No entanto, o alto teor de níquel cria alguns desafios, incluindo alta reatividade superficial e instabilidade estrutural. Através de um método químico, foi realizado revestimento superficial com nióbio. Este tratamento com nióbio não só forneceu uma proteção da superfície, mas também otimizou o comportamento eletroquímico.

Xin et al. (2021), também citam em outro artigo, um cátodo, de óxido de metal em camadas rico em níquel, são os cátodos mais promissores para baterias de íons de lítio da próxima geração em veículos elétricos. Mas, eles perdem mais de 10% de sua capacidade no primeiro ciclo, e a instabilidade estrutural causa a redução da capacidade. O revestimento e a substituição por nióbio são possíveis soluções para resolver esses desafios. Um tratamento de óxido de nióbio, remove as impurezas da superfície formando um revestimento de superfície. A substituição de nióbio estabiliza a estrutura, como

evidenciado pela menor evolução de calor no aquecimento, proporcionando melhor estabilidade em ciclos longos com uma retenção de capacidade de 93,2% após 250 ciclos.

Para Griffith et al. (2021), as baterias de íons de lítio são essenciais para a tecnologia de mobilidade elétrica e agora poderão interromper um século de meios de transporte baseado em combustão. A revolução da eletrificação pode eliminar nossa dependência de combustíveis fósseis e possibilitar um futuro de energia limpa, baterias avançadas facilitariam essa transição. No entanto, devido aos exigentes requisitos de desempenho, custo e segurança, é um desafio implantar produtos em escala industrial. Há perspectivas um novo material de ânodo de bateria de íons de lítio, TiNb₂O₇ (TNO). O TNO pretende ser uma alternativa ao grafite ou ao Li₄Ti₅O₁₂ com melhor taxa e características de segurança e maior densidade de energia. A alta capacidade do TNO impede a formação de dendritos de lítio e sua estrutura de cristal aberto leva a um desempenho de alta potência.

Em outro artigo, Griffith et al. (2021), descreve a dopagem do cátodo com nióbio que modifica sua morfologia primária de partículas para permitir uma adaptação precisa de sua microestrutura. O dopante Nb alonga as partículas primárias e as alinha na direção radial, criando uma configuração que efetivamente dissipa a tensão interna abrupta causada pelas transições de fase perto da extremidade da carga. A não formação da cepa interna melhora substancialmente a estabilidade cíclica de longo prazo alcançada pelo cátodo dopado com Nb, ele retém 90% de sua capacidade inicial após 1000 ciclos, enquanto um cátodo não dopado retém 57,3%. Também permite o carregamento rápido, maior número de ciclos. A estratégia simples de introdução de íons Nb, proposta neste artigo, representa uma solução eficaz que garante vida útil, carregamento rápido e segurança da bateria, sem comprometer sua capacidade.

Varela et al. (2002), revisou cátodos a serem empregados em baterias secundárias de lítio. Esses cátodos possuem grande importância tecnológica e científica, especificamente, materiais para cátodos como polímeros condutores eletrônicos (ECP), óxidos de metais de transição (TMO) e nanocompósitos de ECP/TMO. A utilização de um material catódico específico baseia-se em algumas características intrínsecas que melhoram o desempenho da bateria. Assim, são discutidas algumas vantagens e desvantagens desses compostos de inserção, como a capacidade de inserção do lítio, a densidade energética e a ciclabilidade desses materiais.

3 | O NIÓBIO

O nióbio é um metal extraído a partir do minério pirocloro, Figura 1, com sua maior reserva em Araxá, MG. Ele tem número atômico 41, pertence ao quinto período da tabela periódica e é um metal de transição. Possui vantagens como alta condutividade térmica e elétrica, ductilidade, maleabilidade, alta resistência ao calor, ao desgaste e à corrosão. Essas características tornam os materiais mais eficientes, por proporcionar o

aprimoramento de suas propriedades.



Figura 1: A-Mineral pirocloro, B-Metal nióbio

Fonte: Nióbio do Brasil: Sumário Mineral 2012 – Nióbio

Apesar de toda a discussão sobre o nióbio, este metal não é raro. O minério já foi encontrado em mais de 85 minas que podem ser transformados em nióbio, espalhados pelo mundo todo. O Brasil concentra atualmente 94% das reservas conhecidas e em operação. Poucas minas estão em operação, onde podemos destacar a produção do Brasil com 75% e Canadá com 7%, maiores produtores de nióbio, seguidos por Austrália, Rússia, Dinamarca, países da África e outros países.

Se o nióbio não é raro, porque o Brasil domina a produção deste metal? Um dos motivos é a tecnologia pioneira desenvolvida por uma empresa brasileira, a CBMM, no mercado a mais de 60 anos. Outro motivo é que o mercado ainda é muito pequeno. Somente as reservas da CBMM dariam para suprir o atual consumo por mais de 200 anos.

Como a CBMM nos relata, “A representatividade do Brasil no mercado global se deve ao desenvolvimento deste mercado, liderado por uma empresa brasileira, que investe há mais de seis décadas em tecnologia e aplicações para produtos de nióbio em diversos setores”.

Um dos setores que o nióbio pode trazer benefícios é o de energia, pois é um elemento muito promissor no segmento das baterias.

O nióbio não substituirá o lítio nas baterias, mas pode reduzir ou substituir a utilização de níquel e cobalto. Há grandes estudos para o desenvolvimento de tecnologias de nióbio aplicadas nos cátodos e nos ânodos das baterias.

Como veremos, existem variações de baterias de lítio, mas com a inserção de nióbio representa segurança, durabilidade e ciclabilidade, com carga e descarga super rápidas, sem perda da vida útil.

4 | O NÍOBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Na busca por baterias que entreguem maior potência e possa recarregar mais rápido, pesquisadores se deparam em processos químicos que geram muito calor, encurtando a vida útil das baterias e as vezes até o destruindo.

Óxidos de nióbio (Nb_2O_5) têm sido usados como materiais anódicos para reações de intercalação, amplamente utilizados nas baterias de íons de lítio, proporcionando alta capacidade volumétrica, alta capacidade de carga e descarga (ciclabilidade) e performance.

Também pode ser empregada na fabricação de materiais catódicos. A calcinação resulta em um material com potencial aplicação como cátodo em baterias de íon de lítio, proporcionando uma diminuição da resistência elétrica e aumentando a ciclabilidade.

O estudo de materiais catódicos e anódicos contendo óxidos de nióbio possibilitarão a comercialização de baterias mais estáveis, com diminuição do tempo de recarga, para a aplicação em armazenamento de energia.

As baterias de íons de lítio comumente utilizadas em celulares, eletrônicos diversos e até veículos, convertem energia química armazenada em eletricidade, por meio de reações de oxirredução. Durante a descarga da bateria, o deslocamento dos íons de lítio do ânodo (oxidação) para o cátodo (redução) libera energia elétrica para um consumidor externo. Estas reações podem ocorrer no sentido reverso, possibilitando também a recarga da bateria, como representados na Figura 2.

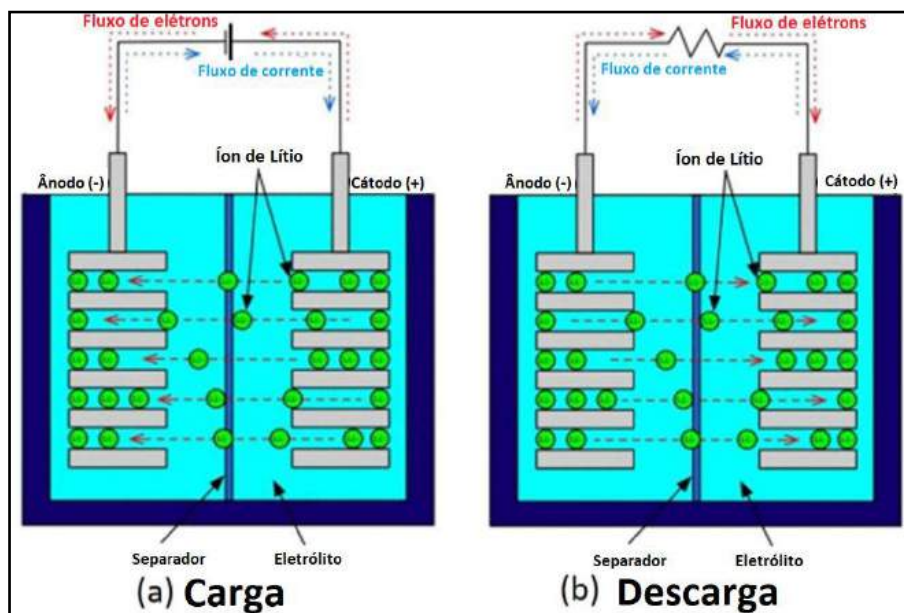


Figura 2: Bateria de íons de lítio

Fonte: Vicente, A. 2019.

O cátodo, Figura 3, das baterias de íons de lítio utiliza, tradicionalmente, óxidos metálicos de Cobalto, Níquel, Manganês e Ferro. Já o ânodo, Figura 4, utiliza grafite, sílica e óxidos de titânio.

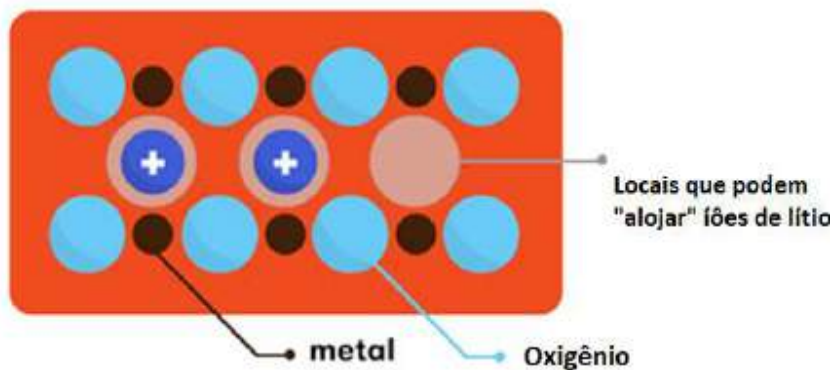


Figura 3: Cátodo (Li-M-O)

Fonte: Vicente, A. 2019.

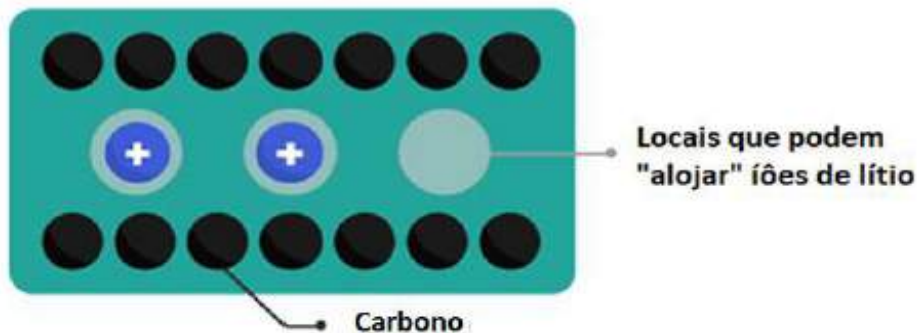


Figura 4: Ânodo (Grafite)

Fonte: Vicente, A. 2019.

Atualmente o mercado busca alta performance, aumento da vida útil e segurança no emprego das baterias de íons de lítio. O Nióbio tem sido cada vez mais estudado como uma excelente alternativa na composição química destas baterias para atender essa demanda.

4.1 Ânodos

O ânodo é o lado negativo da bateria, sofre oxidação porque perde elétrons. Normalmente, o ânodo das baterias de íons de lítio é feito de óxidos metálicos de grafite, titânio e tungstênio.

Grafite: As baterias de íons de lítio compõem tradicionalmente ânodos de grafite. Quando há a necessidade de carga rápida e densidade de corrente elevada, ocorre nesse material a formação de dendritas de lítio metálico, como visto na Figura 5, que faz encurtar

a vida útil da bateria. As dendritas perfuram o separador, causando curto-circuito entre o cátodo e o ânodo, podendo levar a incêndios e explosões.

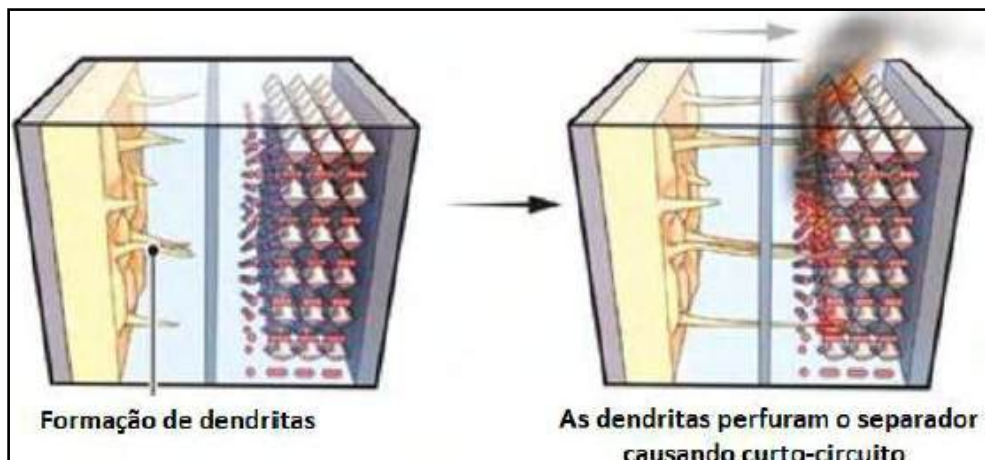


Figura 5: Formação de dendritas na bateria de íons de lítio

Fonte: Vicente, A. 2019.

Outro processo que influencia na performance e redução da vida útil da bateria é a intercalação de íons de lítio na estrutura da grafite (alternância, variação), gerando expansão volumétrica, podendo danificá-la.

- LTO – (Li_2TiO_3 e $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), Titanato de lítio: este óxido substituiu a grafite muito antes da descoberta do Óxido de nióbio. Por volta de 1980, o titanato de lítio começou a ser usado no anodo das baterias de íons de lítio, e já propiciou melhorias significativas de desempenho.

Entre as melhorias realizadas e criadas pela CBMM, está a adição do óxido de nióbio (Nb_2O_5), na composição química dos ânodos, para a criação de novos óxidos metálicos:

- LNO – Niobato de Lítio (Dopagem e Recobrimentos);
- NWO – ($\text{Nb}_{16}\text{W}_5\text{O}_{55}$), Óxido de Nióbio e Tungstênio;
- NTO – (TiNb_2O_7), Óxidos de nióbio e titânio: Composição química em teste nos ânodos, é a combinação que está apresentando o melhor desempenho em baterias de íons de lítio, comparado com os principais ânodos utilizados atualmente como mostrado na Figura 6. É feito através da aplicação de um ânodo de óxido de nióbio-titânio, que tem o dobro da capacidade volumétrica dos anodos à base de grafite, com carregamento ultrarrápido de 90% da bateria, em apenas 6 minutos. Isso permite maior autonomia dos veículos elétricos, podendo chegar a mais de 300 km.

Anode Comparison	Graphite	LTO~LLTO	TNO
Capacity	372	175	388
Voltage	0.1	1.5	1.6
Density	2.3	3.5	4.3
Safety	--	++	++
Charging rate	--	++	++

Figura 6: Diferencial Técnico do NTO

Fonte: Vicente, A. 2019.

4.2 Cátodos

O cátodo é o lado positivo da bateria, é o componente que sofre redução por ganhar elétrons. Normalmente, o cátodo das baterias de íons de lítio é feito de óxidos metálicos de cobalto, ferro, manganês e níquel.

- LCO – Óxido de lítio cobalto: Baterias que contenham este óxido no cátodo têm a maior densidade energética. É encontrada na maioria dos eletrônicos. Desvantagem: possui instabilidade térmica;
- LFP – Fosfato de lítio ferro: Proporciona à bateria boa estabilidade térmica e longo ciclo de vida. Desvantagem: baixa densidade de energia;
- LFMP – Fosfato de lítio ferro manganês;
- LMO – Óxido de lítio manganês: Tem estabilidade térmica e diminui a resistência interna. Desvantagem: capacidade menor e vida útil mais curta;
- LNMO – Óxido de lítio níquel manganês;
- NCM – Óxido de níquel cobalto manganês: baixa resistência interna, alta taxa de carga, boa estabilidade e segurança;
- NCA – Óxido de níquel cobalto alumínio.

Entre os desenvolvimentos feitos pela CBMM, estão a dopagem e recobrimento destes cátodos tradicionais, com nióbio, para melhorar a performance das baterias de íons de lítio, os quais trouxeram os seguintes benefícios:

- Minimizar a dissolução de metais pelo eletrólito;
- Minimizar a formação de oxigênio durante redução do cátodo;

- Aumentar a condutividade elétrica dos cátodos.

4.3 Melhorias no Estado de carga

O *state of charge* (SOC) é o nível de carga de uma bateria em relação a sua capacidade. Sua unidade é apresentada em pontos percentuais, onde 0% é indicação de bateria vazia, e 100% bateria cheia.

Para as baterias de íons de lítio com ânodo de grafite, a janela operacional segura para o SOC ficará entre 30% e 80%, como mostra a Figura 7. Isto implica que, para a bateria de íon de lítio com ânodo de grafite, a capacidade útil será limitada em torno dos 50% de sua capacidade total. Obedecendo o convencionado para uma janela operacional segura, 30% deve ser considerado bateria vazia e 80% bateria cheia.

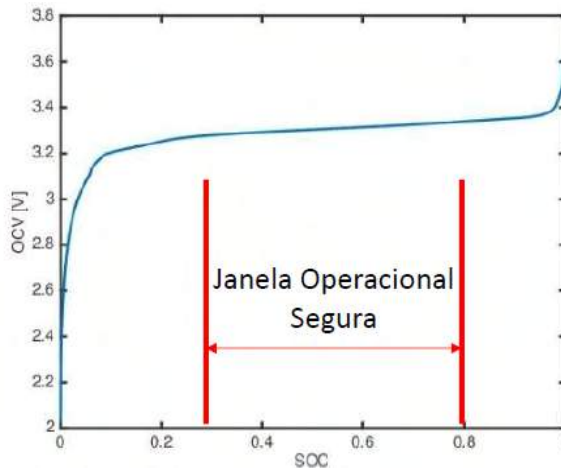


Figura 7: SOC bateria com ânodo de grafite

Fonte: Vicente, A. 2019.

Para as baterias de íons de lítio com ânodo de óxidos de nióbio, a janela operacional segura para o SOC pode expandir-se até a faixa de 5% e 95%, como mostra a Figura 8. Com isso a capacidade útil alcança os 90% de sua capacidade total, agora 10% passa a ser considerado bateria vazia e 95% bateria cheia.

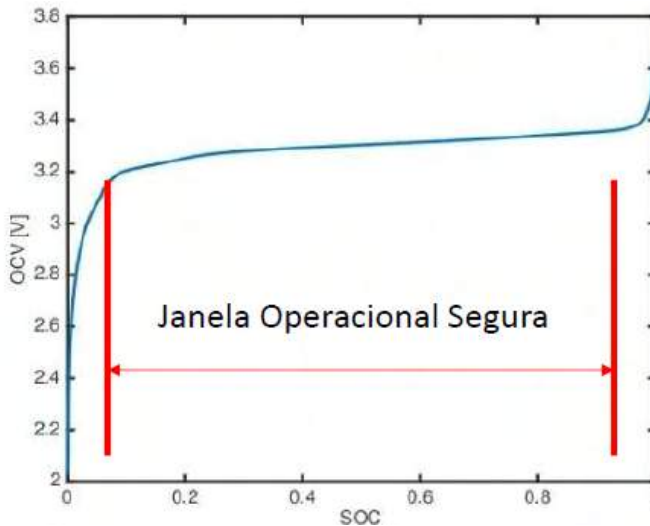


Figura 8: SOC bateria com ânodo de nióbio

Fonte: Vicente, A. 2019.

4.4 Benefícios do uso de nióbio em baterias de íons de lítio

As principais vantagens da aplicação do nióbio em baterias são:

- Maior tensão de operação,
- Condutividade eletrônica e iônica elevadas,
- Maior densidade energética, que permite uma maior autonomia quando aplicada em veículos elétricos;
- maior densidade de potência, permitindo uma recarga mais rápida, menos de 10 minutos;
- Maior estabilidade química
- Maior vida útil, maior durabilidade quando comparada com as tecnologias atuais;
- Maior segurança.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande interesse despertado pelo nióbio nos últimos anos, fez com que áreas de pesquisa de empresas privadas e governamentais investissem na aplicação deste metal, para melhoria das propriedades dos materiais. Se usados em ligas metálicas, trazem resistência mecânica, maleabilidade e condutividade. E se usados como componentes anódicos ou catódicos, atingem maior densidade energética, maior estabilidade química,

maior vida útil e segurança.

Este levantamento destacou a evolução das baterias através da descoberta de novos componentes químicos, mais adequados para a aplicação em baterias, fornecendo maior segurança que é a maior preocupação em relação a estes dispositivos atualmente. Vimos que os óxidos de nióbio proporcionam ligas metálicas com melhorias nas propriedades dos materiais. Pela melhoria na condutividade elétrica, conseguimos uma bateria com grau mínimo de risco de curto circuito e a maior condutividade térmica diminui o aquecimento, o que permite maiores densidades de carga e diminuição do tempo de carga.

O tema sobre utilização do nióbio em baterias não é muito referencialmente difundido. Por se tratar de um tema novo, o material e as publicações utilizadas são bem recentes, permitindo trazer informações bem atualizadas.

REFERÊNCIAS

BRADA, M. **O que são as baterias de nióbio?** Canal Solar, 2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/o-que-sao-as-baterias-de-niobio/>>. Acesso em: 17 abr. 2022.

GRIFFITH, K. J. ET AL. **Microstructure Engineered Ni-Rich Layered Cathode for Electric Vehicle Batteries**. Wiley Online Library, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/aenm.202100884>>. Acesso em: 19 abr. 2022.

GRIFFITH, K. J. ET AL. **Titanium Niobium Oxide: From Discovery to Application in Fast-Charging Lithium-Ion Batteries**. ACS PUBLICATIONS, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c02955>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

Nióbio - Entenda um pouco mais sobre esse metal descoberto no início de 1800. IDM BRASIL, 2019. Disponível em: <<https://idmbrasil.org.br/item/niobio-entenda-um-pouco-mais-sobre-esse-metal-descoberto-no-inicio-de-1800/44/>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

Nióbio: Propriedades e uso – Entrevista com Eduardo Ribeiro (2017). CBMM, 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=09zOLcl8obs>>. Acesso em: 06 abr. 2022.

O QUE É O NIÓBIO. CBMM, 2021. Disponível em: <<https://cbmm.com/pt/Niobio>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

SUMÁRIO MINERAL 2012 – NIÓBIO. NIÓBIO DO BRASIL, 2012. Disponível em: <<https://niobiodobrasil.blogspot.com/2013/01/sumario-mineral-2012.html>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

VARELA, H. et al. **Materiais para cátodos de baterias secundárias de lítio**. Química Nova, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000200017>>. Acesso em: 2 jun. 2022.

VICENTE, A. **O Nióbio nas baterias de íons de lítio**. ResearchGate, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/335128690_O_Niobio_nas_baterias_de_ions_de_litio>. Acesso em: 12 abr. 2022.

XIN, F. ET AL. **Li-Nb-O Coating/Substitution Enhances the Electrochemical Performance of the $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC 811) Cathode**. ACS PUBLICATIONS, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acscami.9b09696>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

XIN, F. ET AL. **What is the Role of Nb in Nickel-Rich Layered Oxide Cathodes for Lithium-Ion Batteries?** ACS PUBLICATIONS, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00190>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

CAPÍTULO 2

FORECAST METHOD FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES: A CASE STUDY OF THE ONTARIO'S ELECTRICAL SYSTEM

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 24/06/2022

Bruno Knevez Hammerschmitt

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/4865207592578956>

Felipe Cirolini Lucchese

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/8546392131996035>

Marcelo Bruno Capeletti

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/1922799731958383>

Renato Grethe Negri

Universidade Federal de Santa Maria, Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/9607795757047650>

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/8009856508464151>

Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Universidade Federal de Santa Maria, Colégio
Técnico Industrial de Santa Maria
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/3425190645010192>

Aizenira da Rosa Abaide

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

ABSTRACT: Renewable resources can be defined as clean and sustainable energy sources that can be harvest from the environment and do not produce greenhouse gas emissions on the generation process. However, these technologies have some limitations regarding generation output, meaning their power is considered volatile and intermittent, making its predictability difficult. Forecasting methods are essential to fully incorporate renewables to the classic electric system standards, which are able of solving complex and non-linear problems, providing high accurate results for operators to make decisions and act on the coordination of the power plants. This paper has the objective to implement an algorithm for short-term (hourly) forecasting applying Multi-Layer Perceptron (MLP) for fotovoltaic solar and wind power generation, using real data from the Ontario Independent Electricity System Operator. The results are compared to the real data operation, and the errors are calculated to provide the accuracy of the method. In addition, the study showed that

the use of MLP can bring satisfactory results for the renewable energy forecast.

KEYWORDS: Power generation forecasting; renewable energy; wind power; photovoltaic solar power; electric system.

MÉTODO DE PREVISÃO PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS: UM ESTUDO DE CASO DO SISTEMA ELÉTRICO DE ONTÁRIO

RESUMO: Recursos renováveis podem ser definidos como fontes de energia limpas e sustentáveis, as quais são obtidas do meio ambiente, e não produzem emissões de gases de efeito estufa no processo de geração. No entanto, essas tecnologias apresentam algumas limitações em relação à saída de geração, tendo como resultado uma potência volátil e intermitente, o que dificulta sua previsibilidade. Os métodos de previsão são essenciais para incorporar totalmente as energias renováveis aos padrões clássicos do sistema elétrico, pois são capazes de resolver problemas complexos e não lineares, proporcionando resultados de alta precisão para que os operadores tomem decisões e atuem na coordenação das usinas. Este trabalho tem como objetivo implementar um algoritmo de previsão de curto prazo (horário) aplicando o modelo Multi-Layer Perceptron (MLP) para geração de energia solar fotovoltaica e eólica, usando dados reais do Operador Independente do Sistema Elétrico de Ontário. Os resultados são comparados com os dados reais de operação, e os erros são calculados para fornecer a precisão do método. O estudo mostrou que o uso da MLP pode trazer resultados satisfatórios para a previsão de energias renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Previsão de geração de energia; energias renováveis; energia eólica; energia solar fotovoltaica; sistema elétrico.

1 | INTRODUCTION

Most of the electricity generated in the world is currently produced by fossil fuels power plants, especially coal and gas, reaching up to around 63% of the world energy matrix. These fossil fuels are considered some of the main responsible for greenhouse gases and pollution emissions into the environment during the burning process, impacting to the current global climate crises (RITCHIE; ROSER, 2020).

To mitigate the dependency on fossil fuel and move to a carbon-neutral generation many countries are investing heavy on Renewable Energy Sources (RES) and expanding their participation into their electric systems. RES is the term used for describing technologies that are sustainable, meaning they can harvest natural resources that are continually replenished in nature, such as: solar (heat or photovoltaic), wind, hydro (ocean or rivers), biomass and geothermal heat. The electricity generated by these sources are considered clean or green since there is no greenhouse gas emissions or any other pollutant released to the atmosphere (QAZI et al., 2019).

The expansion of RES in many countries can be observed as they push to achieve many established goals that were settled during the Paris Agreement in 2015, substantially reducing global gas emissions to avoid the rise of 1.5°C in the planet temperature (UN,

2015). All this commitment led up to huge investments in new renewable power capacity in the past years, reaching a new annual record in 2021 where around 290 gigawatts (GW) of power were installed around the world (IEA, 2021).

Renewable capacity on the planet has reached around 2800 GW in 2022, around 43% of this power is still based on hydro resources. However, Photovoltaic (PV) and wind technologies are increasing their share faster every year, reaching around 26% of the market in 2022 (IRENA, 2021).

There are many reasons for renewables to be expanding, such as: infinite supply, meaning there is no dependency on any kind of fuel that requires extraction or transportation; zero carbon emissions and no environmental impact when producing electricity; decreasing costs with mass production; technology and efficiency improvements.

However, RES also have challenges and disadvantages, more specifically their high intermittency behavior. Intermittency for RES means a non-continuously power supply for every hour of the day, as their fuel is dependent on weather conditions that can be highly unpredictable. In other words, what this means that their power relies on a very specific sets of weather and physical parameters to proper function and provide energy for the grid. In the case of PV the sun is required to be shining along with clear skies to reach the maximum energy production, as for the wind production there is a wind speed range that the generator must receive to function at the optimized point (ELAVARASAN et al., 2020).

A classic example of the renewable energy intermittence issue can be observed in California, United States of America, where the increasing deployment of PV system impacted the electric grid to the point of creating a new operation behavior called the “duck curve” (NREL, 2018). There is also the example of wind energy problem found in England, as the country expanded their electricity production offshore, reaching around 25% installed capacity. However, during 2021 wind energy was only capable of supplying 7% of the full capacity due to very calm and steady weather conditions and leading to an all-time high of \$553 per megawatt-hours (MWh), as coal and gas plants were used to assist the load (MORISON; SHIRYAEVSKAYA, 2021).

As RES expansion around the world speeds up many system operators are searching for strategies that can mitigate the intermittency associated with these sources. Forecasting methods can be implemented to improve this situation and reduce the uncertainty of generation balance. The idea of a forecasting technique is to project future data based on the previous data, involving mathematical and statistical tools that can improve the planning and operation for the electric system.

Thus, this study consists of the short-term generation forecasting for the RES, specifically in wind and PV power generation, with horizons of 12 and 60 hours, evaluating the results with real power data. The method used in this study was the Perceptron Multilayer (MLP) neural network. Finally, the data used on the forecasting model was focused on the Ontario power system data, the Independent Electricity System Operator

2 | FORECAST MODELS

Forecast methods are complex tools that can be used to improve the integration of RES into the electric grid, providing future data of the forecast power that can be generated for many time horizons. Forecast models are basically mathematical algorithms that can perform an analysis based on historical data inputs with the objective to predict future trends and behavior. Fig. 1 and 2 shows an example of a forecasting model applied to wind and PV generation in Germany, showing the power hourly for the real data and the projected one for the same period with the accuracy limits (ZIEHER; LANGE; FOCKEN, 2015).

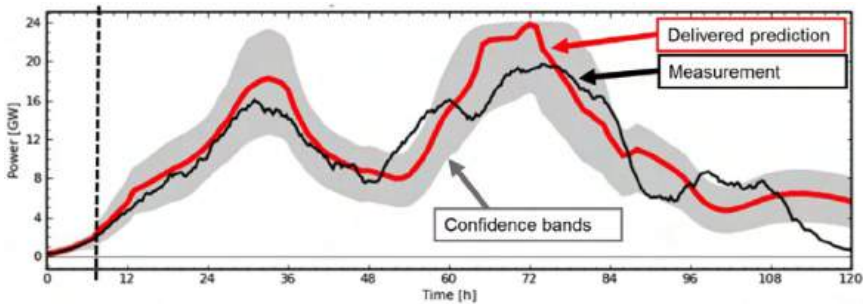


Fig. 1 – Wind power forecast for 5 days horizon.

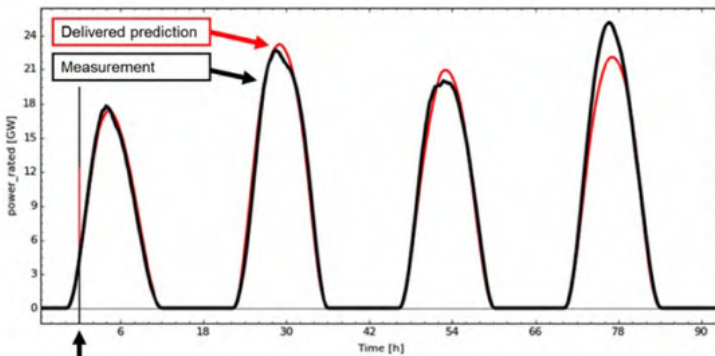


Fig. 2 – PV power forecast for 5 days horizon.

The rapid deployment of renewable resources in the energy sector requires forecasting at multiple timescales in order to properly support the electric system operator on their decisions. These time horizons are very important when deciding which forecasting model to apply depending on the operation challenge, and can be classified as: very short-term (seconds-minutes); short-term (minutes-hours); medium-term (hours-day); long-term (day - week - year) (DEBNATH; MOURSHED, 2018). Fig. 3 shows a summary of these

time periods and their applications (HONG; FAN, 2016).

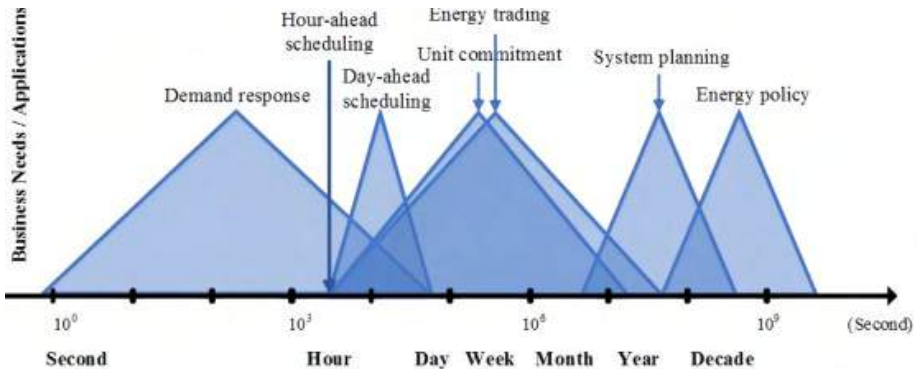


Fig. 3 – Energy forecasting application with the time interval of the forecast.

The energy sector can benefit from forecasting methods for supporting RES as they can be used for improve several operation activities, such as (IRENA, 2020):

- Scheduling and dispatch of power plants, anticipating ramping times;
- Real-time balancing of load and generation, minimizing curtailment;
- Reserves requirements, improving system reliability and flexibility;
- Cost-effect market wholesale, reducing fuel cost;
- Maintenance and contingency planning scheduling improves;
- Market regulation, improving economic signals;

There are many forecasting techniques that can be found in the literature and they can be classified in four mathematical categories: physical, statistical, Artificial Intelligence (AI) and hybrids. Each method has it owns technical parameters (historical data, time-horizons, processing time) along with specific advantages and disadvantages (ESTEVEZ et al., 2015).

The physical model is based on the weather conditions and meteorological data, using parameters such as: area, topography, location, surface conditions, temperature, humidity, pressure, sun position, sunshine hours, wind speed and direction. The combination of all these parameters is then processed with the Numerical Weather Prediction (NWP) algorithm to estimate the generation data for the RES. This method involves a lot of climatic input data and complex mathematical models, demanding a lot of computational time and consequently increased cost (CHEN et al., 2014).

For the statistical approach the idea is to create correlations between the input data and the future projection, using statistics tools based on historical to measure the impact and influence of specific variables within the data. The historical data is basically a sequence

of data points that can present different time periods (hourly, daily, monthly). There are many traditional techniques used for statistical forecasting, the most famous are linear regression and Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA). The main problem with this methodology is the data standards and volume used to perform and obtaining a specific level of quality (RAMIREZ-VERGARA et al., 2022).

The exponential evolution of computational technology resulted in another methodology as an alternative to the classic statistical analysis, the AI. AI is considered a prominent technology that have been applied in many industrial applications: autonomous vehicles, voice and image recognition, automated robots. The expansion of AI methods is mostly due to their learning process capability, as these algorithms can improve their forecasting performance by training with the input data using trial and error over time. Some of the examples of AI methods are: Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), Markov Decision Process, K-nearest Neighbors Regression, Random Forest and Fuzzy Logic (MAKRIDAKIS, 2017).

The main difference between the statistical and AI is the minimization process, as first uses linear equations and the second applies non-linear processes on their error minimization. AI methods have their code based on step-by-step rather than the boolean logic and rules from the traditional programming system, in other words AI are much more complicated to implement and requires greater computational power (VOYANT et al., 2017).

One of the most famous models used by AI is the ANN, able to recognize patterns and solve complex non-linear problems reflecting the human learning process. The main advantage of ANN is that it can provide real-time forecasting used for specific time-horizons (very-short or short-term) with notable accuracy. This study is based in a previous study (HAMMERSCHMITT et al., 2022), that makes use of MLP for forecasting energy generation for a centralized electrical system.

2.1 Algorithm Implementation

The implementation of the MLP algorithm for this project was developed with Python programming language and implemented on the Spyder 3.7 platform from the ANACONDA package, in a notebook with 2.4 GHz Intel Core i7 processor, 8 GB of RAM, 2133 MHz DDR 4, video card GeForce 745M, and a Microsoft Windows 10 operating system. To estimate the wind and PV generation potentials, two MLP were designed, where the architecture of both was composed of a 12 entry in the input layer, the hidden layer containing 6 neurons, and only one output for the last layer. This representation presented satisfactory performance, with the all the parameters obtained by the trial-and-error method, observing the error values and processing times.

The parameters of α and η were respectively 1 and 0.01. The MLP were trained following the MAE evolution, in which, for the wind generation MLP, the training criterion was established until the MAE was less than 0.05 (5%), and the MLP for PV generation with

training stop criterion with a lower MAE of 0.04 (4%). The normalization of the input data was calculated using the Eq. (1):

$$y_i = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

Where, the y_i is the normalized data sample, x is the real data value, x_{max} and x_{min} are the highest and lowest value observed in the real data, respectively.

In the training step, the MLP input data was organized according to their temporal order, on which the input samples have the next sample as learning target, and so on until reaching the last sample of the series data. This process consists of the supervised learning method with delayed inputs. The validation and forecast test followed the same process, with the MLP inputs being the 12 samples prior to the forecast objective and thus estimate power generation for the next hour.

Additionally, after performing the training step of the ANN, the values are submitted to validation tests, where the forecast results are evaluated and the errors are quantified. The validation of the MLP training has the function of monitoring its performance, verifying if the learning is occurring in an adequate means being evaluated by MAE and RMSE, without excessive training, which this a problem that can cause ineffectiveness on the expected forecasting results and impair the ability to generalization. Thus, if the errors are within the desired limits, the ANN will be ready to be applied to the proposed forecast.

Finally, the forecast test step was carried out and the results obtained for the hourly composition of electrical generation expected was expressed and compared to the generation real conditions, thus carrying out the estimates of the PV and wind power generation.

2.2 Renewable energy data

Data is required for developing the MLP method and training the algorithm to be able to forecast the future output for RES. The data used in this project was based on the IESO as they provide public access to their hourly generation output and capacity for the power plant (wind and PV) located in the Ontario region.

For this study PV and wind power plants were selected to be used as training data and also to measure the accuracy of the MLP forecast method developed for the project. The power plants were selected based on the data that were complete from 2018/01/01 to 2019/04/03, all the values were in provided public operator data (IESO, 2022). The historical data from the selected power plants were divided in two data sets, wind and PV, and from there the maximum and minimum values were obtained to perform the normalization mentioned on Eq. (1). These values can be observed in Table I.

Wind Power (MW)		PV Power (MW)	
Max	Min	Max	Min
3950	2	338	0

Table I – Maximum and minimum data values.

After the normalization the data is divided by the application performed on the MLP algorithm:

- 39 Wind and 5 PV Sources (units with complete data) by Ontario IESO
- Training data – 01 hour of 2018/01/01 until 24 hours of 2019/03/31.
- Validation data – 01 hour to 12 hour de 2019/04/01.
- Forecasting period for 12-hour interval – 13 hours to 24 hours of 2019/04/01.
- Forecasting period of 60-hour interval – 13 hours of 2019/04/01, to 24 hours of 2019/04/03.

The training, validation and short-term forecasting (12- and 60-hour period) from the MLP method are presented below.

3 | RESULTS AND DISCUSSION

To better express the results obtained for training and validation, and for the two prediction tests that consist of the 12-hour and 60-hour projection, they will be separated into different subchapters. First, the training and validation results will be addressed. Next, the results predicted by the MLP for the 12-hour period will be presented, with the results in their real magnitudes. Finally, the expected results for the period of 60 hours will be presented, also in their real magnitudes.

3.1 Validation

The results obtained by the MLP during training and validation, for wind generation and PV generation, can be observed respectively in Tables II and III.

MAE training (%)	4,98%
Training time (seconds)	20,52
MAE validation (%)	4,77%
RMSE validation (%)	6,17%
Validation time (seconds)	0,012

Table II – Training and validation of wind data.

MAE training (%)	3,99%
Training time (seconds)	10,03
MAE validation (%)	4,18%
RMSE validation (%)	6,29%
Validation time (seconds)	0,014

Table III – Training and validation of PV data.

According to Table II, during the training of the MLP for the wind generation data, an MAE of 4.98% was obtained, with a processing time of 20.52 seconds. For training validation, MAE and RMSE rates were obtained at values of 4.77% and 6.17%, respectively, with a processing time of 0.012 seconds. As for the MLP referred to the PV generation data, observed in Table III, training MAE was obtained in the value of 3.99% with a processing time of 10.03 seconds. The training validation obtained MAE results of 4.19% and RMSE of 6.29%, with a processing time of 0.014 seconds. From these results, the MLP for wind and PV generation was considered ready to be used in the proposed forecasting study.

3.2 Generation forecast – 12 hours

The results for the wind generation forecast test for the period of 12 hours, presented the values of MAE and RMSE of 7.41% and 8.48%, with a processing time of 1.05 seconds. The graphical results of this analysis can be seen in Fig. 4, which depicts the actual and predicted generation curves for the date of 2019/04/01 from 1 am to 12 am on the same day.

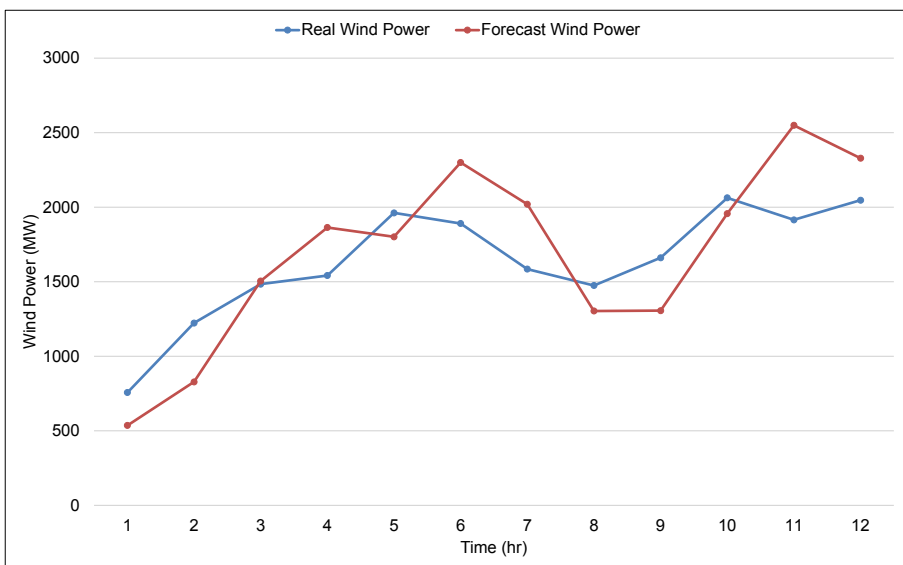


Fig. 4 – Real and forecast wind power for 12 hours periods.

When relating the curves of the actual wind generation and that predicted by the MLP, the greatest variation between the curves is observed at hour 11 am, in the amount of 634 MW. Although there are variations in the profiles of the actual and predicted generation curves, these results are expressive because wind generation is an intermittent energy resource, with low predictability. Furthermore, the effectiveness of the MLP for the prediction of wind generation is proven, observed in Fig. 4 by the similarity of the actual and predicted wind generation curves.

For the PV generation forecasting test for the same period, the MAE and RMSE results were 3.14% and 4.38%, with a processing time of 0.015 seconds. The graphical results of the actual and PV generation forecast are seen in Fig. 5.

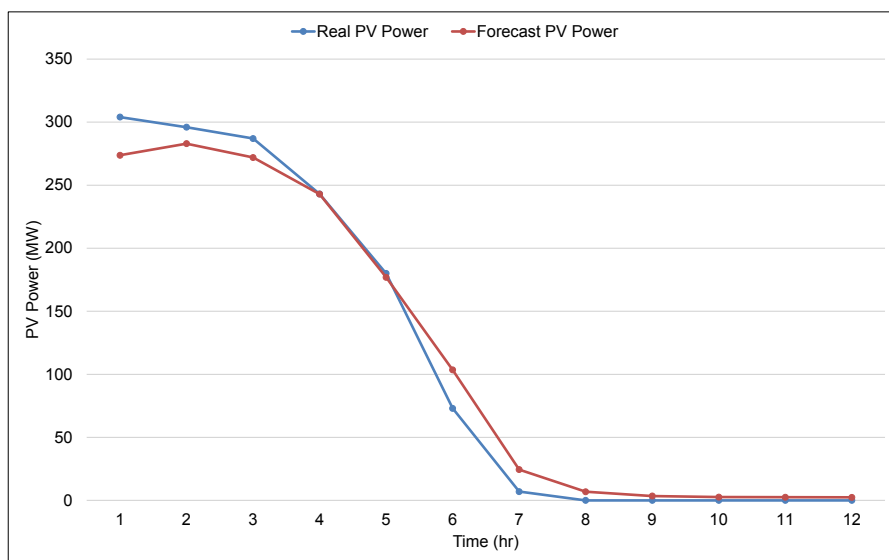


Fig. 5 – Real and forecast PV power for 12 hours periods.

The results obtained for the period of 12 hours of PV generation, portray a certain linearity of the real and predicted curves of the PV generation, a fact that caused the reduction of the forecast errors of the MLP. When observing the actual and predicted curves for PV generation, hour 6 was the biggest difference between the generation curves in the amount of 30 MW occurred. Additionally, as the period of this test coincides with the time of maximum solar intensity, it is possible to observe the reduction of the energy produced from hour 1, which depicts 1 pm on 2019/04/01, with an even more attenuated reduction from hour 3, tending to zero in the hours that followed.

3.3 Generation forecast – 60 hours

When performing the forecast for the period of 60 hours for wind generation, it was

observed that the errors quantified by MAE and RMSE were slightly more significant than the case of the forecast for 12 hours. The prediction errors were 7.48% and 8.80%, for MAE and RMSE, respectively, and with a processing time of 1.02 seconds. Fig. 6 expresses the behavior of the actual and predicted wind generation curves by the MLP for the period from 13:00 on 2019/04/01, until 24:00 on 2019/04/03.

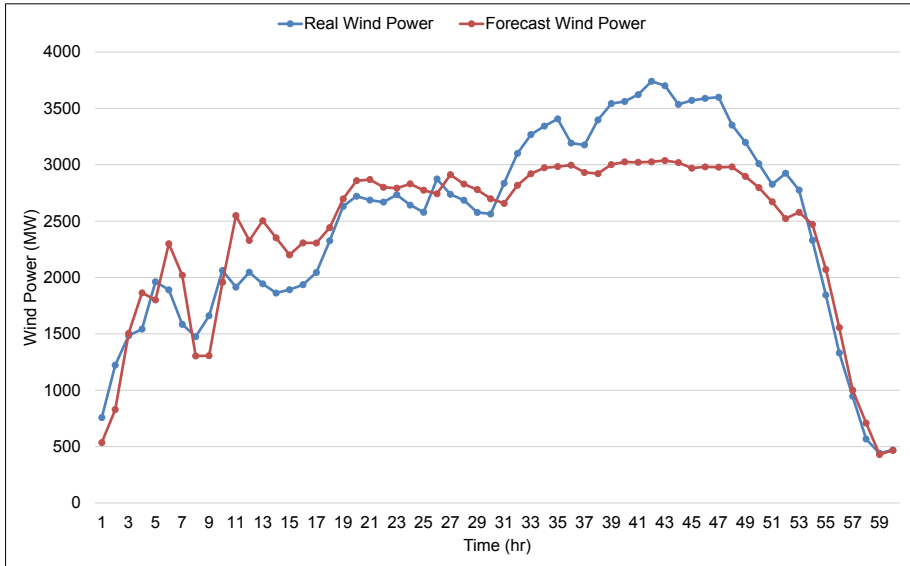


Fig. 6 – Real and forecast wind power for 60 hours periods.

As shown in Fig. 6, the biggest difference between the wind generation curves occurred at hour 42, with a value of 714 MW. When visualizing the wind generation curves in the period of 60 hours, it is noticeable the inconstancy of energy production of this energy resource, and that the disturbances caused by these inconstancies impair its predictability. However, the MLP obtained considerable results for a short-term forecast in view of the difficulties imposed by the intermittence of wind generation.

In terms of PV generation, Fig. 7 expresses the actual and predicted PV generation curves for the 60-hour period. The errors for this forecast test are slightly higher than in the case of the wind generation forecast for the 12-hour period, which were 4.07% and 6.29%, for MAE and RMSE, with a processing time of 0.019 seconds.

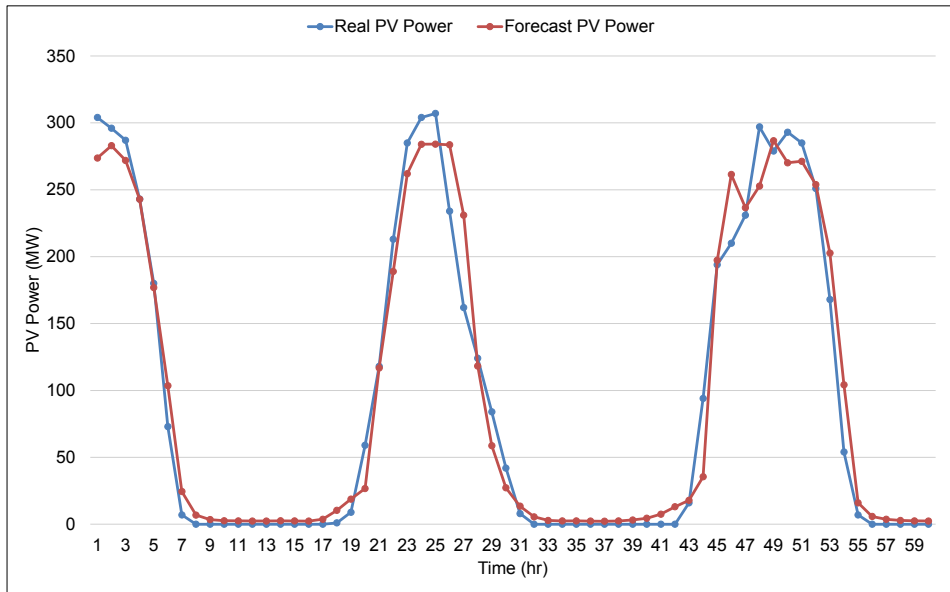


Fig. 7 – Real and forecast PV power for 60 hours periods.

When comparing the curves of real and predicted PV generation by the MLP in Fig. 7, it is possible to observe the pattern of the profiles of daily PV generation, with coincident peaks of maximum power production, a fact that clarifies the efficiency of the MLP for the PV generation forecasting considering the interval of 60 hours. Finally, the biggest difference between the curves was observed at hour 27 with a value of 69MW.

4 | CONCLUSION

Renewable energy is a key solution for the current climate crisis, however it also has a big challenge ahead with the intermittency of their power output, as this variation can impact the electric system in many ways. Generation forecast studies are becoming more essential for introducing higher level of RES, improving the operator decisions to proper control of the electric grid. The expansion of RES will be required increasing computational aid to estimate future data and decrease the generation variation of the system.

There are many methods that can be used to proper forecast depending on the input data, the number of parameters and the time period required by the operator. On this project the MLP algorithm was presented, described and later used with Python programming language to forecast data from RES found in Canada. The selection of this method was based on its capability of solving complex and non-linear problems efficiently.

Thus, this study was developed with the aim of estimating the potential of wind and PV generation for hourly short term. For this, the forecast was carried out considering different periods, 12 and 60 hours, for wind and PV generation. The data results presented a

low MAE and RMSE, consistent with errors for the short-term forecast for both applications, proving the effectiveness of MLP for this type of application.

Although wind generation and PV generation have intermittent energy production, and consequently need complementary energy sources to accommodate their generation variations, when estimating their potentials, it is possible to optimize the available energy resources and reduce dependence on fossils fuel for electricity production. Finally, it is worth noting that this study was carried out using only historical data grouped by type of generation source, and that the insertion of other variables, for instance, wind speed, solar radiation and temperature would improve the forecast results.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the technical and financial support of National Institute of Science and Technology on Distributed Generation Power Systems (INCT-GD), National Council for Scientific and Technological Development (CNPq - n° 465640/2014-1), Higher Level Personnel Training Coordination (CAPES – n° 23038.000776/2017-54), Foundation for Research of the State of Rio Grande do Sul (FAPERGS – n° 17/2551-0000517-1) and Federal University of Santa Maria (UFSM), Brazilian Institutions.

REFERENCES

CHEN, N. et al. Wind power forecasts using gaussian processes and numerical weather prediction. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 2, p. 656–665, 2014. D.O.I.:10.1109/TPWRS.2013.2282366.

DEBNATH, K. B.; MOURSHED, M. Forecasting methods in energy planning models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, n. August 2016, p. 297–325, 2018. D.O.I.:10.1016/j.rser.2018.02.002.

ELAVARASAN, R. M. et al. A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges, and Policies of Leading Indian States with an International Perspective. **IEEE Access**, v. 8, p. 74432–74457, 2020. D.O.I.:10.1109/ACCESS.2020.2988011.

ESTEVES, G. R. T. et al. Long term electricity forecast: A systematic review. **Procedia Computer Science**, v. 55, n. Itqm, p. 549–558, 2015. D.O.I.:10.1016/j.procs.2015.07.041.

HAMMERSCHMITT, B. K. et al. Complementary thermal energy generation associated with renewable energies using Artificial Intelligence. **Energy**, v. 254, p. 124264, 2022. D.O.I.:10.1016/j.energy.2022.124264.

HONG, T.; FAN, S. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. **International Journal of Forecasting**, v. 32, n. 3, p. 914–938, 2016. D.O.I.:10.1016/j.ijforecast.2015.11.011.

IEA. Renewables 2021. **International Energy Agency (IEA) Publications International.**, p. 167, 2021.

IESO. **Data Directory**. Disponível em: <<https://www.ieso.ca/en/Power-Data/Data-Directory>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

IRENA. Advanced Forecasting of Variable Renewable Power Generation. 2020.

IRENA. Renewable Energy Capacity Highlights. **International Renewable Energy Agency**, v. 00, n. March 2021, p. 1–3, 2021.

MAKRIDAKIS, S. The forthcoming Artificial Intelligence (AI) revolution: Its impact on society and firms. **Futures**, v. 90, p. 46–60, 2017. D.O.I.:10.1016/j.futures.2017.03.006.

MORISON, R.; SHIRYAEVSKAYA, A. U.K. Power Surges to Record 400 Pounds as Wind Fails to Blow - Bloomberg. **Bloomberg.Com**, p. 11–14, 2021.

NREL. Ten Years of Analyzing the Duck Chart - How an NREL Discovery in 2008 Is Helping Enable More Solar on the Grid Today. **Nrel**, p. 9–11, 2018.

QAZI, A. et al. Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. **IEEE Access**, v. 7, p. 63837–63851, 2019. D.O.I.:10.1109/ACCESS.2019.2906402.

RAMIREZ-VERGARA, J. et al. Review of forecasting methods to support photovoltaic predictive maintenance. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, n. March, p. 100460, 2022. D.O.I.:10.1016/j.clet.2022.100460.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Electricity Mix**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/electricity-mix>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

UN. **Paris Agreement**. Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

VOYANT, C. et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. **Renewable Energy**, v. 105, p. 569–582, 2017. D.O.I.:10.1016/j.renene.2016.12.095.

ZIEHER, M.; LANGE, M.; FOCKEN, U. **Variable Renewable Energy Forecasting – Integration into Electricity Grids and Markets – A Best Practice Guide**. Disponível em: <https://energypedia.info/images/2/2a/Discussion_Series_06_Technology_web.pdf>.

IDENTIFICADOR DE FALHAS PARA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BASEADO EM SUPPORT VECTOR MACHINE IMPLEMENTADO EM CLOUD

Data de aceite: 01/08/2022

Jacyeude de Moraes Passos Araujo Segundo

Universidade Estadual do Maranhão, PECS
São Luís – MA, Brasil

Carlos Vinicius Alves Coimbra

Universidade Estadual do Maranhão
São Luís – MA, Brasil

RESUMO: Ao passo que a Indústria 4.0 avança, conjuntos de ações de automação e controle vem sendo implementados. Dentro deste contexto o sensoriamento de motores de indução trifásicos vem se tornando remoto e conectado à internet. A manutenção preventiva pode então utilizar esse grande volume de dados para aumentar sua capacidade de detecção de falhas em relação aos métodos clássicos de classificação. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um identificador de diferentes condições, entre normalidade, desbalanceamento no rotor, alimentação por duas fases e desníveis na base de um motor trifásico de indução W22 IR3, com base em dados de análises vibracionais e de correntes elétricas. Utilizando um sistema para aquisição de dados que consiste em um acelerômetro MEMS (Microelectromechanical Systems) e um transformador de corrente não invasivo SCT-013, controlados por um SoC (System on Chip). A análise dos dados foi realizada na IBM Cloud através de Watson Studio e SPSS Modeler para aplicação de um modelo estatístico SVM que foi treinado e testado usando diferentes funções kernel. Observou-se que a oferta da escolha das

funções kernel condicionam os dados a diferentes performances de processamento. A utilização dos algoritmos de classificação SVM, provou ser bastante robusto e eficiente. Mostrando que a capacidade de generalização do classificador foi garantida.

PALAVRAS-CHAVE: Computação na nuvem, motor de indução trifásico, máquinas de vetores de suporte, aprendizado de máquina, IBM Cloud e SPSS Modeler.

ABSTRACT: As the Industry 4.0 advances, the induction motor sensing becomes remote and connected to the Internet. The predictive maintenance can then use this big data to increase your ability do detect faults when compared to the classical multi-signal approach. The purpose of this work is to develop a failure identifier in induction motor W22 IR3, based on current and vibration analysis. Utilizing an embedded system for data acquisition consisting in a MEMS (Microelectromechanical Systems) controlled by a SoC (System on a Chip) and a current transformer. The data analysis will be implemented in IBM Cloud through Watson Studio and SPSS Modeler to apply an SVM statistical model that will be trained and tested using different kernel functions, using the database generated by the embedded acquisition system. Note that an offer of choosing the kernel functions conditions the data with different processing performances. The use of the SVM classification algorithm is quite robust and efficient. Showing that the classifier's generalization capacity was guaranteed.

KEYWORDS: Cloud computing, motor induction

1 | INTRODUÇÃO

O motor trifásico de indução é um dos principais componentes utilizados na indústria. Isso ocorre devido a fatores como alta performance, baixo custo e elevada confiabilidade para gerar energia mecânica a partir da energia elétrica. Tais motores são utilizados em várias áreas da indústria, com aplicações de alta potência e prioridade. Entretanto, apesar da alta confiabilidade, o motor de indução trifásico pode ser exposto a diferentes condições de falhas e tais falhas podem levar o motor a um colapso e eventuais paradas não planejadas na produção (Elmore, 2004).

A premissa da manutenção preditiva é que o monitoramento regular das condições reais das máquinas, e do rendimento operativo dos sistemas de processo, irão maximizar o tempo médio entre reparos. Também minimizará o número e o custo das paradas não programadas criadas por falhas da máquina, e melhorará a disponibilidade (Vinícius, 2012). Os recentes desenvolvimentos de softwares baseados em sistemas inteligentes fizeram com que sistemas de detecção e diagnóstico de falhas, para componentes de sistemas elétricos de potência como o motor de indução, tenham elevada acurácia (Kezunovic M., 1997). Os sistemas baseados em técnicas de inteligência artificial podem substituir um humano, ao prover as informações necessárias sobre a performance de determinado sistema. A aplicação da metodologia de *Support Vectot Machine* (SVM) vem sendo amplamente utilizada para compor sistemas de detecção de falha devido à boa capacidade de generalização e alta taxa de acerto, como consta na literatura de Durgesh Srivastava, Rama Hammo e Vasileios Apostolidis.

Esta pesquisa propõe uma aplicação prática de SVM à identificação de falhas mecânicas e elétricas externas em um motor trifásico de indução através de implementações de algoritmos na nuvem. A metodologia proposta busca interpretar os sinais obtidos de um acelerômetro MEMS ADXL-345 e um sensor de corrente não invasivo SCT-013. A ferramenta estatística SVM será implementado na IBM Cloud® através da utilização da ferramenta de mineração de dados SPSS Modeler.

2 | FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

De acordo com Isermann (2006), o diagnóstico de falhas é baseado na observação analítica e heurística dos sintomas e no conhecimento heurístico do processo, os quais podem ser extraídos a partir da instrumentação das máquinas ou a partir da modelagem do próprio processo. Neste contexto, técnicas baseadas em Inteligência Artificial se mostram promissoras no campo do diagnóstico de falhas, entre as quais destacam-se: SVM, métodos de elementos finitos, redes neurais artificiais, lógica *fuzzy* entre outros como mostram os

artigos a b c .

As falhas dividem-se em elétricas e mecânicas (Bellini et. al., 2008). A Tabela 1 apresenta a classificação das principais falhas em MIT.

Falhas Elétricas	Falhas Mecânicas
Enrolamento do estator Enrolamento do rotor Barras e anéis em curto Desbalanceamento de fase	Desalinhamento Desgaste de acoplamento Excentricidade Rolamento

Tabela 1- Principais falhas em MIT.

Fonte: Adaptado de Belline (2008).

Atualmente o desenvolvimento de aplicações que disponibilizam informações e conectividade em tempo real tem auxiliando a detecção de falhas incipientes. Com base nisso, este artigo utiliza dados adquiridos de aceleração e da assinatura elétrica da máquina, como *database* para alimentar algoritmos de ML para classificar diferentes condições de funcionamento do MIT através de mineração de dados.

3 I CLOUD COMPUTING

O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) define a computação em nuvem como um modelo para permitir acesso conveniente e sob demanda da rede a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis que podem ser rapidamente provisionados e lançado com esforço mínimo de gerenciamento ou interação com o provedor de serviços.

Uma contribuição importante para o crescimento da computação em nuvem acontece através da necessidade atual da velocidade da demanda de entrega de serviço. (Redbook Ibm Cloud, 2017)

3.1 IBM Cloud®

O IBM Cloud é uma plataforma alimentada por projetos *open source*. Com modelos de implantação integrados abrangendo nuvens públicas, privadas, locais e híbridas. Utiliza ainda a estrutura de *back-end* para criar e testar aplicações.

O Watson Studio fornece o ambiente e as ferramentas para análises estatísticas através do IBM SPSS Modeler que é capaz de criar um *data flow* envolvendo *data analytics*, executando etapas de pré-processamento dos dados, sendo possível transformá-los, antes de aplicar algoritmos de ML e avaliar o desempenho do modelo preditivo criado (Watson, 2011).

A essência do ML é um processo automático de reconhecimento de padrões onde o principal objetivo é criar sistemas que possam executar ou exceder a competência de nível

humano ao lidar com tarefas complexos.

Para o desenvolvimento deste artigo foi necessário provisionar os serviços de Watson Studio, Cloud Object Storage e Watson Machine Learn, sendo os subsídios para a utilização de SVM dentro de um fluxo de IBM SPSS Modeler.

4 I MÁQUINAS DE VETORES DE SUPORTE

O classificador SVM é fundamentado no princípio da minimização do Risco Estrutural (Structural Risk Minimization – SRM) proposto por (Vapnik e Chervonenkis, 1974). Formalmente pode-se definir o SRM como uma função $f(x)$ que minimiza o risco médio no conjunto de treinamento.

O princípio da minimização do risco estrutural busca minimizar o erro com relação a um conjunto de treinamento (risco empírico), assim como o erro com relação ao conjunto de testes, isto é, o conjunto de amostras não empregado no treinamento do classificador (risco de generalização). O objetivo do SVM consiste em obter um equilíbrio entre esses erros, minimizando o excesso de ajustes (*overfitting*) que podem reduzir a capacidade de generalização do classificador (Smola et al, 2000).

Em relação ao SRM Vapnik (1998), mostra que, desde que o hiperplano de separação não cometa nenhum erro empírico, ou seja, separe corretamente todos os exemplos de treinamento, maximizar a margem equivale a minimizar o limite superior do risco esperado. Desta forma ao separar um hiperplano com margem máxima, o risco de generalização será minimizado.

4.1 SVM de Margens Rígidas

Define fronteiras lineares a partir de dados linearmente separáveis. Seja T um conjunto de treinamento com n dados $x_i \in X$ e os respectivos rótulos $y_i \in Y$, em que X constitui o espaço dos dados e $Y = \{-1, +1\}$. T é linearmente separável se é possível separar os dados das classes +1 e -1 por um hiperplano (Smola et al 2000).

Classificadores que separam os dados por meio de um hiperplano são denominados lineares (Ana e André C. 2007). A representação de um hiperplano é apresentada na expressão (1), e $\frac{b}{\|w\|}$ corresponde à distância do hiperplano em relação à origem, com $b \in \mathbb{R}$.

$$f(x) = wx + b \quad (1)$$

Essa expressão divide o espaço dos dados em duas regiões: $w \cdot x + b > 0$ e $w \cdot x + b < 0$. Uma função sinal $g(x) = \text{sgn}(f(x))$ pode então ser empregada na obtenção das classificações, conforme ilustrado na expressão 2.

$$g(x) = \text{sgn}(f(x)) = \begin{cases} +1 & \text{se } w \cdot x + b > 0 \\ -1 & \text{se } w \cdot x + b < 0 \end{cases} \quad (2)$$

A partir de $f(x)$, é possível obter um número infinito de hiperplanos equivalentes, pela multiplicação de w e b por uma mesma constante (Vapnik 1998). Define-se o hiperplano

canônico em relação ao conjunto T como aquele em que w e b são escalados de forma que os exemplos mais próximos ao hiperplano: $w \cdot x + b = 0$ satisfaçam a expressão (4) Smola (2000).

$$|w \cdot x_i + b| = 1 \quad (4)$$

Seja x_1 um ponto no hiperplano H_1 : $w \cdot x + b = +1$ e x_2 um ponto no hiperplano H_2 : $w \cdot x + b = -1$, conforme ilustrado na Figura 2. Projetando $x_1 - x_2$ na direção de w , perpendicular ao hiperplano separador $w \cdot x + b = 0$, é possível obter a distância entre os hiperplanos H_1 e H_2 . Essa projeção é apresentada na expressão (5).

$$(x_1 - x_2) \left(\frac{w}{\|w\|} \cdot \frac{(x_1 - x_2)}{\|x_1 - x_2\|} \right) \quad (5)$$

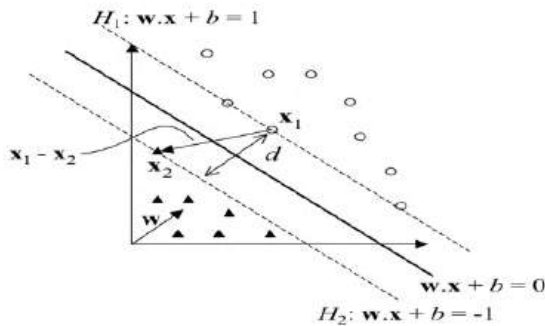


Figura 2 - Distância d entre os hiperplanos H_1 e H_2 .

Fonte: Adaptado de Ana e André C. 2007.

Tem-se que $w \cdot x_1 + b = +1$ e $w \cdot x_2 + b = -1$, representam os espaços entre os hiperplanos. De onde torna-se matematicamente conveniente entre essas equações, chegar a $w \cdot (x_1 - x_2) = 2$. E substituindo esse resultado na expressão (5), tem-se:

$$\frac{2}{\|w\|} \cdot \frac{(x_1 - x_2)}{\|x_1 - x_2\|} \quad (6)$$

Essa é a distância d , ilustrada na Figura 2, entre os hiperplanos H_1 e H_2 , paralelos ao hiperplano separador. Como w e b foram escalados de forma a não haver exemplos entre H_1 e H_2 , $\frac{2}{\|w\|}$ é a distância mínima entre o hiperplano separador e os dados de treinamento. Essa distância é definida como a margem geométrica do classificador linear (Bo Liu, 2005).

A partir das considerações anteriores, verifica-se que a maximização da margem de separação dos dados em relação a $w \cdot x + b = 0$ pode ser obtida pela minimização de $\|w\|$ (Smola et al 2000). Dessa forma, recorre-se ao seguinte problema de otimização:

$$\text{Minimizar } \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (7)$$

Com as restrições: $y_i(w \cdot x_i + b) - 1 \geq 0, \forall (1, \dots, n)$

As restrições são impostas de maneira a assegurar que não haja dados de treinamento entre as margens de separação das classes.

O problema de otimização obtido é quadrático, como a função objetivo minimizada é convexa e os pontos que satisfazem as restrições formam um conjunto convexo, esse problema possui um único mínimo global (Passerini 2004). Problemas desse tipo podem ser solucionados com a introdução de uma função Lagrangiana, que engloba as restrições à função objetivo, associadas a parâmetros denominados multiplicadores de Lagrange.

4.2 SVM de Margens Suaves

Em situações reais é pouco provável que duas classes sejam separáveis por um hiperplano no seu espaço original. O caso das classes não linearmente separáveis é tratado de forma idêntica, sendo, porém, necessário introduzir uma penalização às observações que se encontram do lado errado do hiperplano.

Com as seguintes equações para delineamento das margens do hiperplano:

$$w^T x_i + b \geq 1 - \xi, x_i \in \omega_1 (y_i = 1) \quad (8)$$

$$w^T x_i + b \leq -1 + \xi, x_i \in \omega_2 (y_i = -1) \quad (9)$$

O procedimento de suavização da margem do classificador linear permite que alguns dados de treinamento permaneçam entre os hiperplanos de suporte (Diego Bonesso, 2013).

4.3 Funções Kernel

Em casos onde os dados de treinamento não forem linearmente separáveis, o hiperplano obtido pelo classificador pode ter baixo poder de generalização, mesmo que o hiperplano seja determinado de maneira ótima. Assim, para melhorar a separabilidade linear, o espaço original é mapeado em um espaço de dimensão mais alta chamado de espaço de características. (Diego Bonesso, 2013)

As funções Kernel permitem a classificação em espaços não-linearmente separáveis na etapa de pré-processamento que envolve mudar a representação conforme o exemplo ilustrado na Figura 4, onde o autor mostra a separação de diferentes classes de dados, mostrando que a função kernel adapta os parâmetros "O" e "X" de um caso não linearmente separável, para os " ϕO " e " ϕX " para que possam ser representados em um formato linearmente separável.

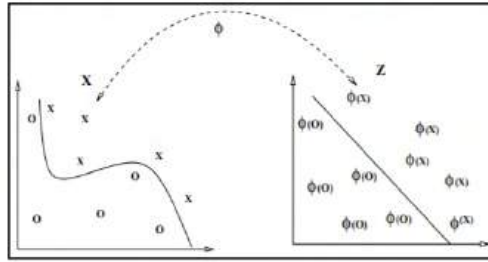


Figura 4 - Mapeamento de um espaço via função kernel.

Fonte: Adaptado de Diego Bonesso 2013.

5 I METODOLOGIA

O contexto da evolução das técnicas de classificação com base em conceitos de ML traz a essência do desenvolvimento deste trabalho. Onde se objetiva classificar diferentes condições do motor de indução através de ferramentas provisionadas em IBM Cloud®.

A aplicação de um sistema de classificação com boa capacidade de generalização como de SVM, dará subsídios necessários para encontrar as classes avaliadas nos testes.

5.1 Sistema de aquisição

O desenvolvimento do sistema de aquisição se deu com base na no esquemático ilustrado na Figura 5. O motor foi conectado a dois sensores: um de corrente (SCT-013) E outro de aceleração para medir a vibração. Em seguida, os sinais são visualizados no monitor serial da interface do Arduino IDE, onde está programada a comunicação do microcontrolador ESP 8266 aos sensores. Tornando possível indexar as leituras dos sensores.

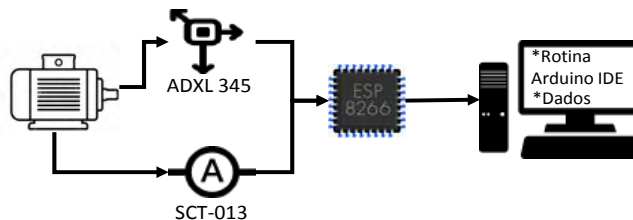


Figura 5 – Esquemático do sistema de aquisição.

Fonte: O próprio autor.

Os dados do acelerômetro ADXL345 foram obtidos através de uma comunicação serial via protocolo SPI. No caso desta pesquisa, foi selecionada a frequência, de 3.2 kHz, atendendo recomendações do fabricante do ADXL 345. Enquanto que o SCT 013 é conectado a uma porta analógica do microcontrolador, funcionando analogamente a um

alicate amperímetro, captando informações sobre a variação de corrente em uma das fases de alimentação do motor.

Foram selecionadas as seguintes condições do motor de indução trifásico, ajustadas as condições de realização dos testes em laboratório:

- Normal.
- Desbalanceamento do rotor.
- Alimentação de Tensão por Duas Fases.
- Desnível na base do motor.

As Figuras 6 e 7 contêm os registros fotográficos das instalações dos locais de teste e dos protótipos.



Figura 6 - Instalações do laboratório.

Fonte: O próprio autor.

A figura 6 mostra o painel de instalação elétrica que foi utilizado para instalações do no motor W22 IR3. Na figura é possível observar a instrumentação do sistema de aquisição de dados sobre o motor.

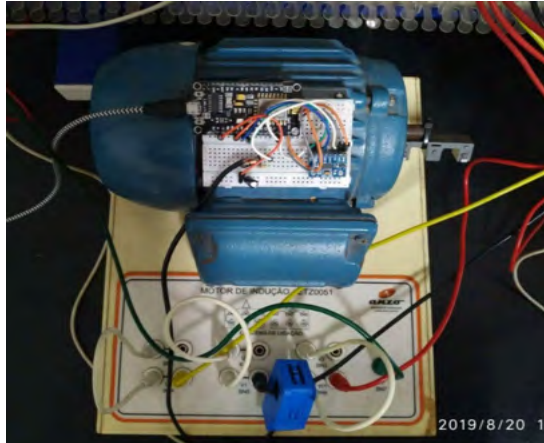


Figura 7 - Vista superior o motor trifásico de indução W22-IR3 instrumentado.

Fonte: O próprio autor.

Para armazenar os dados em um arquivo no formato .CSV, foi utilizado o software *Processing*, que indexou do fluxo dos dados, enquanto fosse requerida esta ação, em períodos de tempo determinados. Estes dados foram organizados em colunas de uma planilha sendo que para cada teste descrito foi gerado um arquivo.

A disposição das leituras do sistema de monitoramento de vibração e corrente gravou os dados de acordo com a Figura 8.

x Normal 1	y Normal 1	z Normal 1	i Normal 1
-8	13	12	376
10	-39	46	372
0	-7	30	355
3	-14	25	291
0	-10	35	214
-7	14	13	147
9	-37	41	66
3	-20	40	0

Figura 8 - Dados obtidos organizados no arquivo .CSV.

Fonte: O próprio autor.

Na organização dos dados obtidos dos sensores, as três primeiras colunas trazem a representação de dados obtidos de x, y e z do ADX-345, e a quarta coluna representa os dados de fluxo da corrente elétrica obtidos da leitura do sensor SCT013. E desta forma foram concebidos os bancos de dados, material fundamental para dar sequência à etapa de implementações em computação na nuvem.

5.2 Implementação

Após o êxito no armazenamento de dados dos testes efetuados no motor de indução em diferentes condições. Seguiu-se o fluxo para etapa de implementação (Figura 9), iniciando a utilização do painel de instrumentos e ferramentas fornecida por IBM Cloud®.

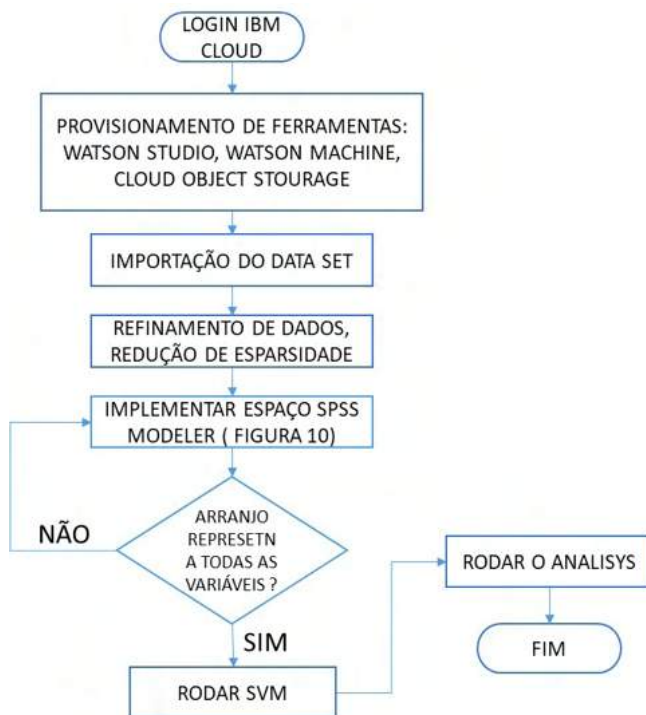


Figura 9 – Fluxograma para o uso do SPSS Modeler.

Fonte: O próprio autor.

A etapa de pré-processamento consiste em identificar e selecionar a quantidade de dados do arquivo farão parte das análises, deixando configurado o fluxo do que deve ser cumprido previamente a aplicação do algoritmo de classificação. Foi utilizado o nó *type* (figura 10) para organizar a leitura das colunas e as descrevendo em valores contínuos, selecionar o alvo da predição (*field target*) que será confrontada com campos específicos selecionados como entradas (*field inputs*), que serão utilizados na simulação.

O nó *partition* divide o banco de dados em duas partes, configurando a simulação em etapas de treino e teste. Utilizando 80 % do banco de dados para treino e 20% para testar o modelo, viabilizando uma verificação da capacidade de generalização do classificador SVM através do teste dos dados com o modelo gerado a partir do treinamento. Enquanto que em *table é possível visualizar os valores*

Na Figura 10 há um fluxo da estruturação no SPSS Modeler para a aplicação de

SVM realizadas para a base de treinamento e teste dos dados, gerando um novo nó, que é o modelo da predição gerado através das funções de decisão de SVM, que deve ser investigado com a finalidade de extrair conhecimento das informações dispostas.

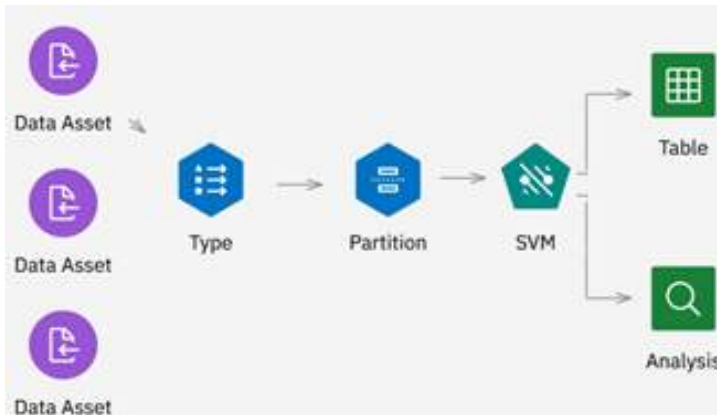


Figura 10 – Representação da aplicação no SPSS Modeler.

Fonte: O próprio autor.

6 | DISCUSSÕES E RESULTADOS

Os resultados das simulações estão descritos a seguir. Estão apresentados em tabelas para facilitar as consultas.

Neste estudo de caso, foram utilizados os valores dos parâmetros de kernel em modo *default*, de acordo com dados da Tabela 2:

	RBF	POLYNOMIAL	SIGMOID	LINEAR
y	0.1	0.5	0.5	-
ϵ	1	0.1	1	0.1
C	10	1	0.1	1

Tabela 2 - Valores dos parâmetros dos kernels aplicados.

Fonte: O próprio autor.

Desta forma foi possível observar o desempenho de classificação proposto por SVM realizou com alto nível de correlação a obtenção de modelos preditivos acerca das características selecionadas, os resultados foram visualizados através do bloco *Analysis* do SPSS MODELER, mostrando que o *kernel polynomial* obteve desempenho superior, como mostrado na Tabela 3.

Condição	Correlação Linear	Kernel
Normal	96%	Rbf
Desbalanceamento	98%	Polynomial
Duas fases	92%	Rbf
Desnível na base	98%	Polynomial

Tabela 3 - Classificação executada nos testes de SVM.

Fonte: O próprio autor.

7 | CONCLUSÕES

Observou-se que a oferta da escolha das funções kernel condicionam os dados a diferentes performances de processamento. Podendo ser possível que sejam necessários vários testes empíricos para que se possa obter a melhor performance das funções, onde a característica de generalização do modelo deve ser mantida.

Os resultados mostram que a utilização da ferramenta de classificação SVM, conseguiu identificar padrões entre diferentes condições ensaiadas no motor de indução em laboratório. Mostrando que a capacidade de generalização do classificador foi garantida, após a geração de modelos preditivos de cada condição ensaiada (tabela 3), chegando a 98% de correlação linear. A representação dos elevados valores da correlação linear representam a proximidade das informações dos dados de entrada e dos modelos gerados. Desta forma a utilização da ferramenta SVM possibilita que sejam reconhecidos padrões a partir de dados históricos e detectá-los quando recebem novos dados.

A aplicação de ferramentas de mineração de dados na IBM Cloud gera modelos preditivos que podem ser acessados de qualquer lugar a qualquer momento, e suas pontuações e previsões podem ser integradas em aplicações através de serviços da web. Tornando dinâmico o processo de implementações desses modelos preditivos desenvolvidos.

O desenvolvimento experimental de técnicas de inteligência artificial podem ser combinadas com as tradicionais técnicas de manutenção, podendo ser uma saída viável para a execução de manutenção industrial eficiente e eficaz no contexto do desenvolvimento indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

Ana e André C. (2007) Uma Introdução às Support Vector Machines. Universidade Federal do ABC.

Bo Liu, Xiao-Wei Yang. (2005) Nesting support vector machine for multi-classification. South China Univ. of Technol., Guangzhou, China

Diego Bonesso (2013) Estimação dos Parâmetros do Kernel em um Classificador SVM na Classificação de Imagens Hiperespectrais em uma Abordagem Multiclasse. UFRGS.Porto Alegre.

Durgesh Srivastava (2010) Data classification using support vector machine. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*.

Elmore, W. (2004) A. Protective relaying theory and applications. New York, NY: Marcel Dekker.

IBM Systems and Technology (2011) Watson. Um Sistema Projetado para Respostas.

Isermann Rolf (2006) Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin.

Kezunovic, M. (1997) A survey of neural network application to protective relaying and fault analysis. *Engineering Intelligent Systems*, vol. 5.

Passerini. Kernel Methods (2004) Multiclass classification and applications to computational molecular biology. Università Degli Studi di Firenze.

Rama Hammo (2014) Faults Identification in Three-Phase Induction Motors Using Support Vector Machines.

REDBOOK IBM (2017) Cloud Object Storage as a Service International Technical Support Organization.

Smola, Peter Bartlett, Bernhard Schölkopf and Dale Schuurmans (2000). *Advances in large margin classifiers*. London, MIT Press.

Vasileios Apostolidis Afentoulis (2015), SVM Classification with Linear and RBF kernels.

Vapnik, V. Chervonenkis, A. (1974) *Theory of Pattern Recognition*. Berlin, Akademie Verlag.

Vapnik, V (1998). *Statistical Learning Theory*. NY, Wiley.

Vinícius A. D. Silva (2012) Detecção de falhas em motores elétricos através das máquinas de vetores de suporte. Universidade Estadual De Campinas.

DETECÇÃO DE AVARIAS EM ISOLADORES DE POTÊNCIA: UMA PESQUISA DA LITERATURA CORRELATA À UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 24/06/2022

Ivan Nunes da Silva

Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/0448891472280429>

Beatriz de Lima Tavares

ARGO Energia
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/4506838174117920>

Sofia Moreira de Andrade Lopes

Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/1277390036356439>

Daniilo Hernane Spatti

Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/7371885828178292>

Rogério Andrade Flauzino

Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/4487681434814567>

Victor Hideki Yoshizumi

Universidade de São Paulo (USP/EESC/SEL)
São Carlos – SP
<http://lattes.cnpq.br/8378904835843389>

Ana Cláudia Carvalho Barquete

ARGO Energia
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/0533920838682298>

RESUMO: A investigação da detecção de avarias em isoladores de potência tem se voltado para as variáveis chaves envolvidas no processo de envelhecimento destes dispositivos. Sobretudo em ambientes com poluição severa, a degradação dos isoladores de maneira prematura traz riscos à operação do sistema, bem como prejuízos às concessionárias, as quais perdem receitas com desligamentos não programados ou manutenções executadas antes do período estabelecido pelos fabricantes. Muitas técnicas têm sido propostas em literatura e assinalam os sistemas inteligentes como uma das ferramentas mais promissoras para se resolver o problema de detecção precoce de avarias em isoladores de potência. Porém, pode-se observar, em uma análise mais ampla, que existe uma grande dificuldade em se apontar soluções factíveis, as quais permitam generalizar as propostas para os mais diversos tipos de problemas encontrados na prática por meio da utilização de ferramentas com inteligência. Com base nestes conceitos, este trabalho apresenta uma pesquisa da literatura a respeito da utilização de técnicas de inteligência computacional, visando-se então fornecer subsídios para a aplicação de tais ferramentas em problemas envolvendo a detecção prematura de avarias em isoladores de sistemas de transmissão de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Isoladores de potência, sistemas inteligentes, aprendizagem de máquinas, sistemas de transmissão de energia elétrica.

FAILURE DETECTION IN POWER INSULATORS: A RESEARCH OF THE LITERATURE RELATED TO THE USE OF INTELLIGENT SYSTEMS

ABSTRACT: The investigation of failure detection in power insulators has focused on the key variables involved in the aging process of these devices. Especially in environments with severe pollution, the premature degradation of insulators brings risks to the operation of the system, as well as losses to electric utilities, which lose revenue from unscheduled shutdowns or maintenance performed before the period established by the manufacturers. Many techniques have been proposed in the literature, which point out that intelligent systems are one of the most promising tools to solve the problem of early failure detection in power insulators. However, in a broader analysis, it can be seen that there is a lot of difficulty in pointing out solutions, which allow generalizing the proposals for the most diverse problems encountered in practice through the use of tools with intelligence. Based on these concepts, this work presents a literature search on the use of computational intelligence techniques, in order to provide subsidies for application of such tools in problems involving the premature detection of failures in insulators of power transmission systems.

KEYWORDS: Power insulators, intelligent systems, machine learning, power transmission system.

1 | INTRODUÇÃO

A satisfação que os clientes observam de um sistema elétrico tem uma estreita ligação com dois aspectos envolvendo a qualidade de energia, ou seja, a continuidade do fornecimento e o cumprimento dos níveis pré-determinados de tensão e frequência. De fato, estes dois aspectos relacionam-se com a qualidade de energia do ponto de vista de serviço e do ponto de vista de produto, respectivamente (SHAIK; MAHELA, 2018).

Com a segmentação dos sistemas elétricos em setores, o de transmissão é o responsável pelo transporte da energia em níveis mais elevados de tensão, visando-se uma operação segura e contínua do sistema, à medida que interconectam as centrais geradoras às subestações de distribuição de energia elétrica. Este setor pode ter sua continuidade afetada por uma infinidade de fatores. Entretanto, é de grande valia destacar a ação de envelhecimento dos isoladores de potência como sendo uma das principais causas envolvendo desligamentos não programados, afetando assim a qualidade de serviço (VERMA; REDDY, 2019).

Os ambientes a que estes dispositivos estão submetidos, muitas vezes contaminados por poluição de diversos tipos, acabam por acelerar o processo de envelhecimento, ou ainda, favorecer o aparecimento de falhas, especialmente descargas parciais (PETRI *et al.*, 2020).

Como as técnicas de detecção do nível de severidade da degradação na maioria das vezes são realizadas por inspeções invasivas e que podem necessitar de desligamentos programados, observa-se então atualmente um crescente número de propostas não invasivas de detecção de avarias que se fundamentam no monitoramento de variáveis

ambientais e elétricas. Com o propósito de se alimentar uma ferramenta de inteligência computacional capaz de fornecer uma resposta agregadora de todos os aspectos envolvidos com a detecção da degradação dos isoladores, cada vez mais pesquisas estão então buscando resolver o problema com abordagens variadas, tais como estimação de parâmetros, classificação de padrões e até mesmo otimização, empregando-se para tanto ferramentas com algum tipo de inteligência (ZHANG; CHEN, 2020).

A adoção de tais estratégias advém do fato de que, operando em condições ambientais diversas, os isoladores podem apresentar comportamentos não esperados ou ainda falhas indesejáveis, fazendo-se com que as variáveis ambientais e elétricas sejam de fundamental importância de monitoramento (HAO *et al.*, 2020).

Em um ambiente cada vez mais conectado, o conceito de *Smart Grid* aplicado aos Sistemas de Transmissão permite abstrair que as informações passarão a estar disponíveis em volumetria e velocidade compatível com a Internet das Coisas, tornando-se então o monitoramento de grandezas locais ou de repositórios uma realidade, a qual não pode ser descartada para a produção de soluções visando à detecção prematura da degradação dos isoladores (GHASEMPOUR, 2019).

Desta forma, pode-se apontar que um Sistema Inteligente é o mais procurado quando é preciso o relacionamento de grandezas de diferentes abstrações, conceitos e quantificação.

A utilização destas técnicas exige um grande conhecimento de Ciência de Dados por parte dos desenvolvedores, pois a incorreta preparação ou relacionamento destas grandezas pode acarretar em propostas não confiáveis, ou ainda, não generalizáveis, fornecendo-se então respostas incompatíveis para determinada classe de problemas.

A pesquisa da literatura apresentada neste capítulo, portanto, tem por objetivo fornecer ao leitor uma oportunidade de compreensão crítica das diversas propostas atualmente disponíveis, as quais visam a detecção da degradação de isoladores de sistemas de transmissão sob condições de poluição. Para tanto, serão então analisados aspectos envolvendo as variáveis elencadas para extração de características, tipos de sistemas inteligentes empregados, quantidade e qualidade dos dados utilizados nos processos de aprendizagem, dentre outros, em relação a trabalhos de grande visibilidade publicados nos últimos anos.

Nas seções a seguir serão apresentadas tais análises com uma breve explanação sobre o tópico alvo no início de cada seção. Comentários e considerações serão também apresentados ao fim de cada seção.

2 | ASPETOS DE ARQUITETURA E TOPOLOGIA DE SISTEMAS INTELIGENTES

Quando se busca a utilização de Sistemas Inteligentes para a resolução de problemas aplicados, muitos aspectos de arquitetura e topologia são determinados de

maneira metodológica; porém, também muitos os são de maneira empírica tendo por base a experiência do especialista sobre o assunto (KOOPIALIPOOR *et al.*, 2019).

Desta maneira, esta seção irá apresentar uma análise, em forma de tabela, de alguns trabalhos proeminentes em literatura que buscaram resolver o problema da detecção de avarias em isoladores de transmissão do ponto de vista de filosofia adotada para resolução do problema, visando-se então fornecer subsídios para o leitor tomar decisões quanto à escolha da ferramenta inteligente mais apropriada para determinado tipo de problema. Tais informações são apresentadas na Tabela 1.

Referência	Técnica utilizada	Modelamento	Topologia	Comparativo
BELHOUCHE; BAYADI; BENDIB, 2015	Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Genéticos	Aproximação de Funções	10 indivíduos e 200 gerações	<i>Binary-coded genetic approach</i> e método de mínimos quadrados para os Algoritmos Genéticos e literatura para a Rede Neural Artificial
KHAFAT; EL-HAG, 2018(a)	Rede Neural Feedforward Não Linear Autoregressiva	Previsão de Série Temporal	10 neurônios e 2 atrasos temporais	X
GOUDA; KHALIFA, 2017	Redes MLP e RBF em paralelo	Classificador de Padrões	MLP: 10-40 RBF: 50-20-10	X
KHAFAT; EL-HAG, 2018(b)	-Rede Neural Feedforward Não Linear Autoregressiva -Modelo de Entrada-Saída -NARX	Previsão de Série Temporal	Duas camadas escondidas e de 5 a 7 atrasos no tempo	Comparado qualitativamente com SVM e KNN
MUSSINA <i>et al.</i> , 2020	CNN e Binary MLP	Classificação de Padrões	-CNN: 5 camadas de convolução e duas camadas densas -Binay MLP: 12-5	Múltiplos algoritmos
TERRAB; BAYADI; EL-HAG, 2015	Sistema Fuzzy	Classificação de Padrões	3 regras	X
CHAOU; MEKHALDI; TEGUAR, 2015	-KNN -NBC -SVM	Classificação de Padrões	X	Comparativo entre as ferramentas
DE SANTOS; BOBI, 2020	Random Forest	Aproximação de Funções	X	Comparativo com RNA e SVM
XIA <i>et al.</i> , 2018	-SVM -Fuzzy -Algoritmos Genéticos	Classificação de Padrões	X	Comparativo com MLP
THANH; CHO; DA, 2021	MLP e PSO	Previsão de Série Temporal	X	Comparativo com MLP, KNN e SVM

Tabela 1. Aspectos de Arquitetura e Topológicos de Sistemas Inteligentes.

Dos artigos reunidos na Tabela 1, apenas a referência (GOUDA; KHALIFA, 2017) utilizou uma base de dados mista para os processos de aprendizado por empregar respostas reais e simuladas, sendo que os demais utilizaram dados colhidos em seus próprios aparatos experimentais.

O termo MLP (*Multilayer Perceptrons*) refere-se às redes Perceptrons Multicamadas, as quais são redes neurais do tipo *feedforward* e que podem ser empregadas tanto em classificação de padrões como em aproximações de funções (GARDNER; DORLING, 1998). O termo RBF (*Radial Basis Function*) refere-se às Redes Neurais de Base Radial, que também podem ser empregadas em classificação de padrões ou aproximação de funções (LEONARD; KRAMER, 1991, PARK; SANDBERG, 1991).

O termo NARX (*Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs*) refere-se às Redes Neurais Auto-regressivas com Entradas Exógenas, as quais são utilizadas em previsão de séries temporais (LIN *et al.*, 1996).

Já as Redes Neurais Convolucionais, ou CNN (*Convolutional Neural Network*), são amplamente aplicadas em problemas de classificação de padrões com dimensões de grande porte, especialmente aqueles envolvendo a classificação de imagens (O'SHEA; NASH, 2015).

O termo SVM (*Support Vector Machines*) refere-se às Máquinas de Vetores de Suporte, as quais são ferramentas de aprendizagem de máquinas também amplamente empregadas em problemas de classificação de padrões de grande porte, comumente apresentando melhores resultados que redes neurais do tipo MLP (VAPNIK; IZMAILOV, 2017).

O algoritmo KNN (*K-Nearest Neighbors*), ou K-ésimo Vizinho Mais Próximo, pode ser utilizado tanto em problemas de Classificação de Padrões quanto de Aproximação de Funções (ZHANG; MANI, 2003), assim como o *Random Forest* (BREIMAN, 2001).

O termo NBC (*Naive Bayes Classifier*) representa um classificador de padrões probabilístico que possui forte independência dos dados de entrada (LIU *et al.*, 2013).

O termo PSO (*Particle Swarm Optimization*), ou Otimização por Enxame de Partículas, refere-se a um algoritmo de otimização normalmente aplicado em classes de problemas de grande porte (KENNEDY; EBERHART, 1995).

Assim, uma variedade de modos de modelamento do problema pode ser observada a partir da Tabela 1; porém, em sua maioria são classificadores de padrões que buscam apresentar ao especialista um status da condição do isolador. Já os problemas modelados como aproximação de funções procuram estimar os parâmetros com base nas entradas escolhidas no processo de aprendizado, pois neste caso não se empregam dados atrasados no tempo. Há ainda as situações envolvendo a previsão de séries temporais, em que há a necessidade do emprego de entradas atrasadas no tempo, pois os autores procuraram estimar, por exemplo, a corrente de fuga nos isoladores.

Entretanto, uma análise mais ampla permite inferir que muitos autores combinaram

técnicas de otimização em suas propostas, em que não necessariamente modelam o problema como sendo de otimização. Ocorre que muitos passos dos algoritmos de aprendizado inteligente constituem-se de terminações topológicas ou paramétricas, os quais são propícios ao emprego de técnicas de otimização, tais como a determinação da quantidade de neurônios nas camadas e número de camadas escondidas, assim como de parâmetros internos dos algoritmos como taxas de aprendizado e quantidade de clusters, dentre outros.

Estudos envolvendo comparação de uma proposta com outras apontadas em literatura são fundamentais para o leitor balizar o impacto daquela abordagem para a sua escolha, sendo que isto se fez ausente em muitos trabalhos pesquisados e não somente nos apontados neste capítulo. Desta forma, torna-se possível elencar métodos de comparação com técnicas convencionais, com outras técnicas inteligentes, ou ainda, com outras comparações de literatura, mesmo que qualitativas.

Neste último entendimento, faz-se então necessário um questionamento a respeito da comparação com técnicas convencionais sobre o levantamento de teste de hipótese envolvendo o emprego de sistemas inteligentes. Este tópico será mais bem explorado na próxima seção.

3 | TESTE DE HIPÓTESE ENVOLVENDO O EMPREGO DE SISTEMAS INTELIGENTES

Atualmente, verifica-se em diversas áreas de conhecimento um encaminhamento para o emprego cada vez maior de ferramentas de inteligência computacional. Tal prática, sem método de análise do problema, pode implicar em propostas fundamentalmente fracas em termos de teste de hipótese quanto ao uso de um algoritmo de inteligência. De fato, existem diversos fatores que, além de promissores para o uso dessas ferramentas, são também primordiais para obtenção de resultados melhores quando comparados com aqueles advindos da aplicação de ferramentas convencionais (HORVITZ; BREESE; HENRION, 1988).

Assim, naquelas situações em que ferramentas convencionais já conseguem resolver os problemas de maneira eficiente, dificilmente então uma ferramenta inteligente conseguirá soluções melhores. Porém, ainda é possível o emprego de sistemas inteligentes nas soluções de tais problemas, uma vez que estas (em muitos casos) podem ser de mais fácil obtenção quando se visa propósitos de prototipagem, ou ainda, possibilitam uma melhor extração do relacionamento entrada/saída frente às ferramentas convencionais, analíticas ou numéricas.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo com relação às referências envolvendo justamente uma análise qualitativa sobre o teste de hipótese implementado.

Referência	Técnica utilizada	Modelamento	Teste de Hipótese
BELHOUCHE; BAYADI; BENDIB, 2015	Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Genéticos	Aproximação de Funções	X
KHAFAT; EL-HAG, 2018(a)	Rede Neural Feedforward Não Linear Autoregressiva	Previsão de Série Temporal	X
GOUDA; KHALIFA, 2017	Redes MLP e RBF em paralelo	Classificador de Padrões	X
KHAFAT; EL-HAG, 2018(b)	-Rede Neural Feedforward Não Linear Autoregressiva -Modelo de Entrada-Saída -NARX	Previsão de Série Temporal	X
MUSSINA <i>et al.</i> , 2020	CNN e Binary MLP	Classificação de Padrões	X
TERRAB; BAYADI; EL-HAG, 2015	Sistema Fuzzy	Classificação de Padrões	A incerteza com a sobreposição dos sinais de corrente de fuga, associada com a divisão das classes, foi utilizada para apoiar a escolha da ferramenta.
CHAOU; MEKHALDI; TEGUAR, 2015	-KNN -NBC -SVM	Classificação de Padrões	X
DE SANTOS; BOBI, 2020	Random Forest	Aproximação de Funções	X
XIA <i>et al.</i> , 2018	-SVM -Fuzzy -Algoritmos Genéticos	Classificação de Padrões	X
THANH; CHO; DA, 2021	MLP e PSO	Previsão de Série Temporal	X

Tabela 2. Teste de Hipótese.

A partir da análise da Tabela 2, observa-se que apenas a referência (TERRAB; BAYADI; EL-HAG, 2015) apresenta explicitamente um teste de hipótese que justifique o emprego de Sistemas Fuzzy, o qual se baseia nos princípios das incertezas associadas ao problema. As demais propostas não deixaram explícita tal fundamentação, sendo que algumas observações são necessárias para complementar as informações aos leitores, ou seja:

- **Modelagem de classificação de padrões:** a justificativa da escolha de redes MLP precede o fato de as classes serem não linearmente separáveis, ou ainda, com regiões não convexas de separação (SCHALKOFF, 2007). O mesmo entendimento pode ser repassado para a SVM e a CNN.
- **Aproximação de funções:** as MLP justificam-se pelo Teorema da Aproximação Universal de Funções, em que as MLP com mais de duas camadas escondidas podem aproximar qualquer função matemática (SCARSELLI; TSOI, 1998). Nes-

te caso, é então necessário que o comportamento seja de difícil aproximação por técnicas convencionais.

- **Previsão de séries temporais:** os métodos de previsão convencionais falham ao especificar dados no futuro, sendo então uma possibilidade de atuação de técnicas de sistemas inteligentes, com a capacidade para obtenção de previsão de séries em sistemas dinâmicos. Para tanto, torna-se imprescindível a distinção entre Aproximação de Funções e técnica de Previsão de Séries Temporais, tendo-se em vista que a primeira não é apta para atuar em sistemas dinâmicos, ou seja, a variável a ser estimada depende dela mesma, tal como tipicamente modelado em sistemas de controle (HUNT *et al.*, 1992).
- **Dimensionalidade do problema:** este caso é o que permite inferir que SVM, CNN e KNN apresentariam melhores resultados que as MLP, tendo-se em vista sua ótima atuação em problemas de grande dimensionalidade de dados, sejam padrões, classes, entradas, instâncias etc. Cabe-se salientar que a instituição da CNN foi especificamente desenhada para propósitos envolvendo o processamento e tratamento de imagens (SIMARD; STEINKRAUS; PLATT, 2003).
- **Hibridização de técnicas:** o emprego simultâneo de mais de um sistema inteligente precisa ser calcado no fato de que o uso isolado de determinada técnica não conseguiria resolver o problema, sobretudo se comparado com técnicas convencionais. Um caso típico é a utilização de MLP com alguma técnica de otimização, a fim de se ter seus parâmetros internos encontrados de maneira ótima (MEDSKER, 2012).

Outro fato que surge destas análises é a necessidade de preparação dos dados para aprendizado. Conforme mencionado, aspectos de justificativa quanto à dimensionalidade estão intimamente relacionados e, neste caso, é de fundamental importância que análises de pré e pós-processamento dos dados sejam lançados.

4 | ASPECTOS DE DADOS PARA APRENDIZAGEM

A análise estatística dos dados disponíveis para aprendizado constitui uma importante etapa envolvendo o emprego de ferramentas inteligentes. Isso advém do fato que reside também nos dados parte da justificativa de utilização de técnicas inteligentes, tais como dimensionalidade, quantidade de atributos, inter-relacionamentos, dentre outros (AITCHISON, 1982).

Ao se utilizar bancos de dados, sejam eles coletados experimentalmente ou simulados, é imprescindível também se observar a presença de *outliers* (valores atípicos), pois estes podem impactar negativamente na eficiência da ferramenta. Desta forma, será então apresentado na Tabela 3 um resumo da análise dos dados utilizados nas propostas e que servirão para as discussões desta seção.

Referência	Técnica utilizada	Pré-processamento	Origem dos Dados
BELHOUCHE; BAYADI; BENDIB, 2015	Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Genéticos	X	Valores de tensão de <i>flashover</i> dependentes das dimensões dos isoladores, obtidos experimentalmente para quatro isoladores diferentes.
KHAFAT; EL-HAG, 2018(a)	Rede Neural Feedforward Não Linear Autoregressiva	X	Base de dados de corrente de fuga utilizando-se uma câmara experimental para a umidificação dos isoladores por meio de um umidificador ultrassônico, a qual foi obtida para diferentes níveis de contaminação e umidade.
GOUDA; KHALIFA, 2017	Redes MLP e RBF em paralelo	X	A base de dados do treinamento foi obtida experimentalmente em laboratório; todavia, a base de dados de teste foi adquirida via simulação de um modelo dinâmico.
KHAFAT; EL-HAG, 2018(b)	-Rede Neural Feedforward Não Linear Autoregressiva -Modelo de Entrada-Saída -NARX	X	Base de dados de corrente de fuga utilizando-se uma câmara experimental para a umidificação dos isoladores por meio de um umidificador ultrassônico, a qual foi obtida para diferentes níveis de contaminação e umidade.
MUSSINA <i>et al.</i> , 2020	CNN e Binary MLP	Transformada Wavelets e PCA	Para a CNN são obtidas imagens dos isoladores em situação de inverno utilizando um drone; para a MLP são obtidas medições de corrente de fuga através de experimentos laboratoriais.
TERRAB; BAYADI; EL-HAG, 2015	Sistema Fuzzy	Transformada Wavelet e de Fourier	Os dados são obtidos experimentalmente utilizando uma câmara para simular a névoa, e os valores de corrente de fuga são medidos para os isoladores em diferentes níveis de umidificação.
CHAOU; MEKHALDI; TEGUAR, 2015	-KNN -NBC -SVM	RQA	Os dados foram obtidos experimentalmente em laboratório por um procedimento de umidificação e contaminação artificial do isolador.
DE SANTOS; BOBI, 2020	Random Forest	X	Dados medidos durante 22 meses de umidade, pressão atmosférica, direção do vento, velocidade do vento, nível de chuva, temperatura, ponto de orvalho, radiação solar, nível de poeira e corrente de fuga.

XIA <i>et al.</i> , 2018	<p>-SVM -Fuzzy -Algoritmos Genéticos</p>	<p>Parâmetros foram extraídos do sinal de corrente de fuga, tais como: amplitude, fase e distorção harmônica total do sinal. Esses dados foram utilizados como entrada para o modelo SVM. A amplitude e a fase do sinal foram extraídas para cada instante no domínio da frequência utilizando a transformada S.</p>	<p>A base de dados utilizada foi obtida experimentalmente em testes de poluição artificial, nos quais os níveis de umidade e de contaminação dos isoladores foram variados.</p>
THANH; CHO; DA, 2021	MLP e PSO	Filtros e normalizações	<p>As variáveis monitoradas foram a temperatura, umidade, ponto de orvalho e imagens de descargas parciais. As imagens das descargas são utilizadas como entradas exógenas do sistema e delas são extraídas a porcentagem da área da descarga e a mudança no brilho da imagem em relação às situações sem descarga. Além disso, os dados de corrente de fuga foram medidos por meio de um anel instalado na superfície dos isoladores.</p>

Tabela 3. Aspectos de Dados para Aprendizagem.

O termo PCA (*Principal Component Analysis*) refere-se ao algoritmo que tem como princípio de funcionamento reconstruir o conjunto de dados original com o mínimo possível de dados que estão contidos neste mesmo conjunto (ABDI; WILLIAMS, 2010).

O termo RQA (*Recurrence Quantification Analysis*) refere-se ao algoritmo que é empregado para análises de dados não lineares provenientes de sistemas dinâmicos. Em essência, a técnica quantifica tanto o número como a duração das recorrências relacionadas a um sistema dinâmico frente ao seu percurso no espaço de fase (Webber Jr; Zbilut, 2005).

Muitos trabalhos apresentados na Tabela 3 não deixaram explícito como os dados foram obtidos. No entanto, é possível se realizar observações para melhor compreensão dos leitores, ou seja:

- **Múltiplas fontes de dados:** os sistemas inteligentes que mais tiveram sucesso utilizaram para suas análises grandezas de múltiplas abstrações, tais como elétricas, climáticas, ambientais e de poluição. Isto porque é possível uma gama maior de características a serem extraídas (VERMA; REDDY; CHAKRABORTY, 2018).
- **Dados no domínio do tempo:** muitos dados que foram apresentados aos sistemas inteligentes das propostas, apesar de não ser explicitamente citado, fo-

ram processados. Especialmente os dados elétricos coletados, geralmente no domínio do tempo, apresentam uma quantidade muito grande de pontos, que poderiam ser tratados por sistemas como SVM e CNN. Porém, ao se empregar ferramentas como MLP é então fundamental que estes dados sejam processados no domínio do tempo. Geralmente, sinais elétricos no domínio do tempo são também processados utilizando-se filtros RMS (MIHAELA; HEYDT, 2003) ou PCA para redução de dimensionalidade.

- **Dados no domínio da frequência:** os dados no domínio da frequência podem ser tão ou mais representativos que no domínio do tempo. Isso se deve ao fato de que mais características podem ser extraídas com menos variáveis, reduzindo-se então a complexidade algorítmica na entrada dos sistemas inteligentes (BARTLETT, 1998). Atualmente, as técnicas de Transformada Wavelet vêm substituindo aquelas envolvendo Transformada de Fourier, visto que a primeira é capaz de realizar análises no tempo e na frequência com uma quantidade reduzida de pontos, além de funcionar tanto para sinais estacionários quanto não estacionários (STEFENON *et al.*, 2020). De fato, a justificativa de utilização da Transformada de Fourier em sinais não estacionários está no fato de se empregar a Transformada de Fourier Janelada ou STFT (*Short-Time Fourier Transform*), ou ainda, a Transformada S (XIA *et al.*, 2018).
- **Dados discretos:** o emprego de dados discretos, especialmente aqueles de grandezas ambientais e climáticas também carecem de maiores detalhes. Estes dados precisam ser normalizados de maneira a se respeitar os limites mínimos e máximos envolvendo os processos de aprendizado. Se não respeitados tais limites, as matrizes de aprendizado podem então incorrer em mal condicionamento, ou ainda, limites impróprios que podem levar a validações inconsistentes de generalização. Usualmente, busca-se que os dados sejam discretizados sob o mesmo critério, tais como dados a cada minuto, a cada hora, etc. Caso não seja possível, o ideal é que um critério comum seja realizado, significando-se que dados artificiais necessitam ser inseridos ou dados reais precisam ser retirados em um processo de reamostragem (DIXON; EARLS, 2009).
- **Busca por outliers:** a busca e eliminação de *outliers* são fundamentais para garantir a integridade do processo de aprendizado. Esses *outliers* podem ser um erro de medição ou armazenamento, mas também pode ser um dado crucial para o processo de treinamento, especialmente da MLP. Por isso, simplesmente desprezá-lo não é uma solução ótima quando se irão empregar sistemas inteligentes (LIANO, 1996). O conjunto de dados ainda pode ser preenchido com uma ferramenta inteligente, tal como MLP, ou seja, o processo de reamostragem quando necessita da inclusão de dados que foram excluídos por *outliers* pode ser realizado por meio de uma ferramenta com inteligência (TRAN; GARCEZ, 2016).

51 CONCLUSÕES

Uma pesquisa foi feita neste capítulo considerando trabalhos proeminentes na literatura que trataram do monitoramento da condição de isoladores de potência nos últimos anos. Quanto aos objetivos dos trabalhos analisados, a maioria deles está focada em prever ou estimar uma variável específica, a qual está relacionada à condição do isolador, como LC (*Leakage Current*) ou emissões acústicas. No entanto, eles não fornecem sistemas inteligentes completos que possam tomar decisões considerando os diversos aspectos que estão relacionados com a operação do isolador e a ocorrência de *flashovers* (descargas disruptivas).

Outro aspecto investigado diz respeito à seleção da topologia e arquitetura do sistema inteligente, assim como a importância de se determinar uma metodologia para apoiar essa escolha, devido então ao impacto que esses aspectos têm sobre o desempenho do modelo. Além disso, os estudos também foram avaliados quanto à presença de análises comparativas entre seus métodos e os convencionais. Também foi destacada a importância de apresentar esta análise para agregar confiabilidade aos resultados, os quais podem ser utilizados pelos leitores como uma métrica para a escolha de sistemas inteligentes adequados para cada aplicação em particular.

A importância de avaliar sistematicamente a necessidade de métodos inteligentes para cada aplicação, usando testes de hipóteses, por exemplo, também foi investigada. Essa avaliação geralmente não é observada na literatura e pode impedir os projetistas de aplicar métodos inteligentes em problemas que poderiam ser resolvidos com métodos convencionais simples. Este procedimento é uma fase importante durante a construção de um sistema inteligente, sendo tão relevante quanto o pré e pós-processamento do conjunto de dados utilizado como entrada do modelo. Os sistemas inteligentes muitas vezes passam por uma fase de aprendizado durante a sua implementação, sendo que esta é profundamente dependente dos dados disponíveis, ou seja, se tais dados não representarem corretamente o sistema que está sendo modelado, o aprendizado será então deficiente e levará a modelos inteligentes com mau desempenho.

Portanto, em suma, este trabalho apresentou uma extensa revisão sobre trabalhos relevantes encontrados na literatura, sendo que a principal contribuição foi extrair suas principais características para relacioná-los qualitativamente com conceitos básicos de construção de sistemas inteligentes, os quais normalmente são negligenciados. Ao criar um novo modelo inteligente, para qualquer aplicação, considerar os aspectos que foram levantados durante esta sintetização pode fazer uma grande diferença entre um modelo de sucesso e um modelo com baixo desempenho. Assim, espera-se que este estudo forneça subsídios conceituais para pesquisadores que trabalham com sistemas inteligentes, especialmente aqueles que investigam o monitoramento de condições de isoladores de potência.

REFERÊNCIAS

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 4, p. 433-459, 2010.

AITCHISON, J. The statistical analysis of compositional data. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 44, n. 2, p. 139-160, 1982.

KHAFAT, N. A.; EL-HAG, A. Bayesian regularization of neural network to predict leakage current in a salt fog environment. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 25, n. 2, p. 686-693, 2018(b).

BARTLETT, P. L. The sample complexity of pattern classification with neural networks: the size of the weights is more important than the size of the network. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 44, n. 2, p. 525-536, 1998.

BELHOUCHE, K.; BAYADI, A.; BENDIB, M. E. Artificial neural networks (ANN) and genetic algorithm modeling and identification of arc parameter in insulators flashover voltage and leakage current. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING*, 4., 2015, Boumerdes, Argélia. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2015.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

CHAOU, A. K.; MEKHALDI, A.; TEGUAR, M. Recurrence quantification analysis as a novel LC feature extraction technique for the classification of pollution severity on HV insulator model. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 6, p. 3376-3384, 2015.

DE SANTOS, H.; BOBI, M. A. S. A cumulative pollution index for the estimation of the leakage current on insulator strings. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2020.

DIXON, B., EARLS, J. Resample or not?! Effects of resolution of DEMs in watershed modeling. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 12, p. 1714-1724, 2009.

GARDNER, M. W.; DORLING, S. R. Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 14-15, p. 2627-2636, 1998.

GHASEMPOUR, A. Internet of things in smart grid: architecture, applications, services, key technologies, and challenges. **Inventions**, v. 4, n. 1, 22, 2019.

GOUDA, O. E.; KHALIFA, D. M. Online monitoring of medium voltage overhead distribution lines polluted insulators severity. **IET Journals**, v. 2017, 5 p., 2017.

HAO, Y. *et al.* Experimental investigation on influence of shed parameters on surface rainwater characteristics of large-diameter composite post insulators under rain conditions. **Energies**, v. 13, n. 19, 5011, 2020.

HORVITZ, E. J.; BREESE, J. S.; HENRION, M. Decision theory in expert systems and artificial intelligence. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 2, n. 3, p. 247-302, 1988.

HUNT, K. J. *et al.* Neural networks for control systems—a survey. **Automatica**, v. 28, n. 6, p. 1083-1112, 1992.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization (PSO). *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS*, 1995, Perth, Australia. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 1995.

KHAFRAF, N. A.; EL-HAG, A. H. Prediction of leakage current peak value. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MECHATRONICS AND ITS APPLICATIONS*, 11., 2018(a), Sharjah, Emirados Árabes Unidos. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2018(a).

KHAFRAF, N. A.; EL-HAG, A. Bayesian regularization of neural network to predict leakage current in a salt fog environment. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 25, n. 2, p. 686-693, 2018(b).

KOOPIALIPOOR, M. *et al.* Applying various hybrid intelligent systems to evaluate and predict slope stability under static and dynamic conditions. **Soft Computing**, v. 23, n. 14, p. 5913-5929, 2019.

LEONARD, J. A.; KRAMER, M. A. Radial basis function networks for classifying process faults. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 11, n. 3, p. 31-38, 1991.

LIANO, K. Robust error measure for supervised neural network learning with outliers. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 7, n. 1, p. 246-250, 1996.

LIN, T. *et al.* Learning long-term dependencies in NARX recurrent neural networks. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 7, n. 6, p. 1329-1338, 1996.

LIU, B., *et al.* Scalable sentiment classification for big data analysis using naïve bayes classifier. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA*, 2013, Silicon Valley, USA. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2013.

MEDSKER, L. R. **Hybrid intelligent systems**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. 312 p.

MIHAELA, A.; HEYDT, G. T. On the use of RMS values in power quality assessment. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 4, p. 1586-1587, 2003.

MUSSINA, D. *et al.* Multi-modal data fusion using deep neural network for condition monitoring of high voltage insulator. **IEEE Access**, v. 8, p. 184486-184496, 2020.

O'SHEA, K.; NASH, R. An introduction to convolutional neural networks. ARXIV, v. 1511.08458, 10 p., 2015.

PARK, J.; SANDBERG, I. W. Universal approximation using radial-basis-function networks. **Neural Computation**, v. 3, n. 2, p. 246-257, 1991.

PETRI, L. P. S. *et al.* A portable system for the evaluation of the degree of pollution of transmission line insulators. **Energies**, v. 13, n. 24, 6625, 2020.

SCARSELLI, F.; TSOI, A. C. Universal approximation using feedforward neural networks: A survey of some existing methods, and some new results. **Neural Networks**, v. 11, n. 1, p. 15-37, 1998.

SCHALKOFF, R. J. Pattern recognition. *In*. WAH, B. W. (org.). **Wiley encyclopedia of computer science and engineering**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

SHAIK, A. G.; MAHELA, O. P. Power quality assessment and event detection in hybrid power system. **Electric Power Systems Research**, v. 161, p. 26-44, 2018.

SIMARD, P. Y.; STEINKRAUS, D.; PLATT, J. C. Best practices for convolutional neural networks applied to visual document analysis. *In*: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DOCUMENT ANALYSIS AND RECOGNITION , 7., 2003, Edinburgh, UK. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2003.

STEFENON, S. F. *et al.* Wavelet group method of data handling for fault prediction in electrical power insulators. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 123, 106269, 2020.

TERRAB, H.; BAYADI, A.; EL-HAG, A. H. A fuzzy logic based approach to evaluate the surface conditions of ceramic outdoor insulators. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 4., 2015, Boumerdes, Argélia. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2015.

THANH, P. N.; CHO, M. Y.; DA, T. N. Insulator leakage current prediction using surface spark discharge data and particle swarm optimization based neural network. **Electric Power Systems Research**, v. 191, 106888, 2021.

TRAN, S. N.; GARCEZ, A. S. A. Deep logic networks: Inserting and extracting knowledge from deep belief networks. **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, v. 29, n. 2, p. 246-258, 2016.

VAPNIK, V.; IZMAILOV, R. Knowledge transfer in SVM and neural networks. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, v. 81, n. 1-2, p. 3-19, 2017.

VERMA, A. R.; REDDY G. S.; CHAKRABORTY, R. Multistress aging studies on polymeric insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 25, n. 2, p. 524-532, 2018.

VERMA, A. R.; REDDY, B. S. Interpretation of surface degradation on polymeric insulators. **Engineering Failure Analysis**, v. 95, p. 214-225, 2019.

WEBBER JR, C. L.; ZBILUT, J. P. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. **Tutorials in Contemporary Nonlinear Methods for the Behavioral Sciences**, v. 94, n. 2005, p. 26-94, 2005.

XIA, Y., *et al.* Applying S-transform and SVM to evaluate insulator's pollution condition based on leakage current. International conference on the properties and applications of dielectric materials, 12., Xi'an, China. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2018.

ZHANG, D.; CHEN, S. Intelligent recognition of insulator contamination grade based on the deep learning of ultraviolet discharge image information. **Energies**, v. 13, n. 19, 5221, 2020.

ZHANG, I.; MANI, I. kNN approach to unbalanced data distributions: a case study involving information extraction. *In*: WORKSHOP ON LEARNING FROM IMBALANCED DATASETS, 2003, Washington DC, USA. **Anais [...]**. Palo Alto: AAAI, 2003.

LEITURA DE PARÂMETROS DE MOVIMENTO DE UM PÊNDULO RÍGIDO CONTÍNUO UTILIZANDO SENSOR DE EFEITO HALL

Data de aceite: 01/08/2022

Getúlio Teruo Tateoki

IFSP-Campus Avançado Tupã
Tupã, SP, Brasil

Jackson Tsukada

FEITEP-Faculdade de Engenharia e Inovação
Técnico Profissional
Maringá, PR, Brasil

INTRODUÇÃO

Atualmente, existem vários dispositivos sensores desenvolvidos e já utilizados em diversos tipos de aparelhos eletroeletrônicos. Um deles é o sensor de efeito Hall (HAMSDEN, Edward Hall) que ao detectar em sua proximidade a presença de um campo magnético eleva um nível de tensão elétrica na sua saída.

Este dispositivo pode ser utilizado para fazer com que, ao detectar a presença de um determinado sentido de um campo magnético por um ímã (GRIFFITHS, David J.) faz acionar um campo magnético de sentido oposto ao mesmo através de uma bobina causando conseqüentemente entre si uma repulsão e com isso, fazendo movimentar um pêndulo rígido de forma contínua. Devido à interação física existente entre a movimentação do pêndulo (HALLIDAY, David; RESNICK, Robert.) e eletrônica originada e detectada pelo sensor,

a leitura de seus parâmetros de funcionamento podem ser efetuados de uma maneira eficaz.

Este trabalho teve por finalidade mostrar a descrição do funcionamento, leitura da frequência e de parâmetros da tensão de alimentação e corrente fornecido à bobina para movimento de um pêndulo rígido contínuo para análise e coleta de dados utilizando sensor de efeito Hall que posteriormente pode ser utilizado para outras análises e conclusões.

METODOLOGIA

Para obter a funcionalidade, bem como as suas leituras correspondentes do movimento do pêndulo rígido foi inicialmente estudadas, analisadas e elaboradas em várias partes:

- Estudo e análise dos sensores de efeito Hall;
- Circuito de acionamento do solenoide;
- Estudo, análise e construção do solenoide;
- Construção do pêndulo rígido e
- Leitura de medidas do movimento do pêndulo.

Estudo e análise dos sensores de efeito Hall

Os sensores de efeito Hall detectam a presença de um campo magnético em sua proximidade e enviam um sinal elétrico na sua

saída. São constituídos por materiais semicondutores que com a força originada pela presença de um campo magnético faz desviar a trajetória do percurso de cargas elétricas proporcionado pela aplicação de uma corrente elétrica externa (RAMSDEN, Edward.). O acúmulo dessas cargas elétricas nas faces laterais proporciona uma diferença de potencial que pode ser detectada conforme a Figura 1.

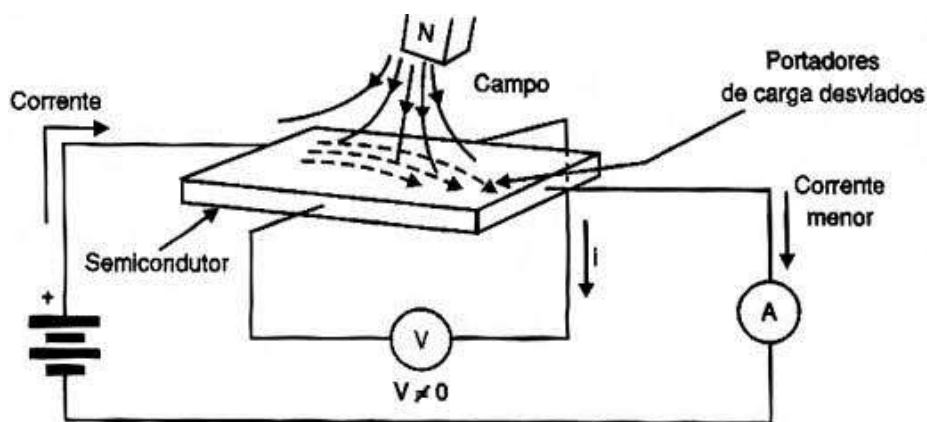


Figura 1- Princípio de detecção de campo magnético pelo sensor de efeito Hall

Fonte: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-os-sensores-de-efeito-hall-art1050>>

Existem basicamente quatro tipos de sensores: Monopolar, que opera na presença de um campo magnético positivo, cessando quando este campo se vai; Bipolar, que detecta e permanece em operação na presença de um campo magnético de polo sul e só cessa quando detecta um campo magnético de polo norte; Omnipolar, que detecta e permanece em operação tanto na presença de um campo magnético de polo sul ou norte e só cessa quando detecta um campo magnético de sentido oposto; Latch de efeito Hall, que tem sua entrada acionada na presença de um ímã e mantém acionada até que sinta novamente a presença de um campo magnético. Foi utilizado neste trabalho o sensor Omnipolar devido à simplicidade na sua elaboração e montagem, não necessitando com isso na montagem do pêndulo ficar observando se o ímã fixado na extremidade do pêndulo está posicionado perante a bobina com o polo voltado para o norte ou sul.

Circuito de acionamento do solenoide

O circuito de acionamento do solenoide serve para magnetizar um solenoide toda vez que através de um sensor de efeito Hall detectar a presença de um campo magnético. O campo magnético gerado no solenoide deverá possuir a mesma polaridade do ímã, ou seja, se o ímã tiver polaridade norte o campo magnético gerado também deverá também ser e vice versa para que produza entre ambos uma força de repulsão fazendo que

assim, toda vez que o ímã passar diante do solenoide surja uma força que faça acelerar o movimento do pêndulo (RAMSDEN, Edward.). Além disso, este circuito deve introduzir um tempo de retardo entre o momento da sensibilização do campo magnético e o acionamento do solenoide para que o pêndulo possa continuar a sua trajetória, porém com uma força introduzida pela presença do campo magnético originado pelo solenoide.

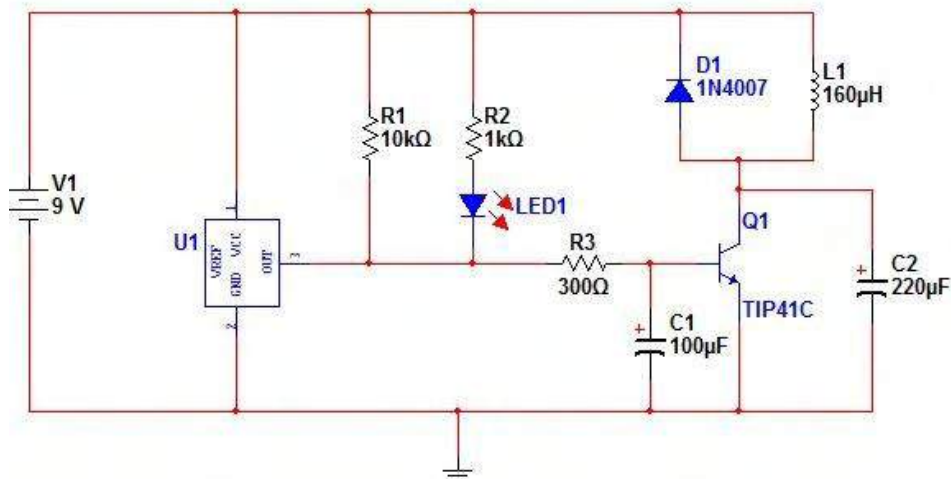


Figura 2 – Circuito de acionamento de solenoide

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Conforme mostra o esquema elétrico da Figura 2 o circuito de solenoide é basicamente um dispositivo que proporciona um ganho de corrente através do transistor TIP41C com um tempo de retardo ocasionado pelo resistor R3 e capacitor C1. O sensor de efeito Hall, indicado como U1 na figura, emite um sinal de nível alto na sua saída 3 toda vez que detectar a presença de um campo magnético e assim permanece e só volta ao nível baixo quando sentir a presença de um novo campo magnético de sentido oposto, que é ocasionado pelo solenoide. O LED1 serve para indicar este campo magnético detectado pelo sensor. O diodo D1 impede que a corrente elétrica ocasionada devido à interrupção da energia armazenada no solenoide indicado como L1 possa fluir no coletor do transistor o que poderia causar dano no mesmo. Ainda, o capacitor C2 tem a função de manter a tensão no coletor do transistor bastante estável o que facilita a sua visualização no osciloscópio. A foto da Figura 3 mostra este circuito montado em uma placa de circuito impresso e o sensor de efeito Hall preso ao solenoide que causa a repulsão do ímã.

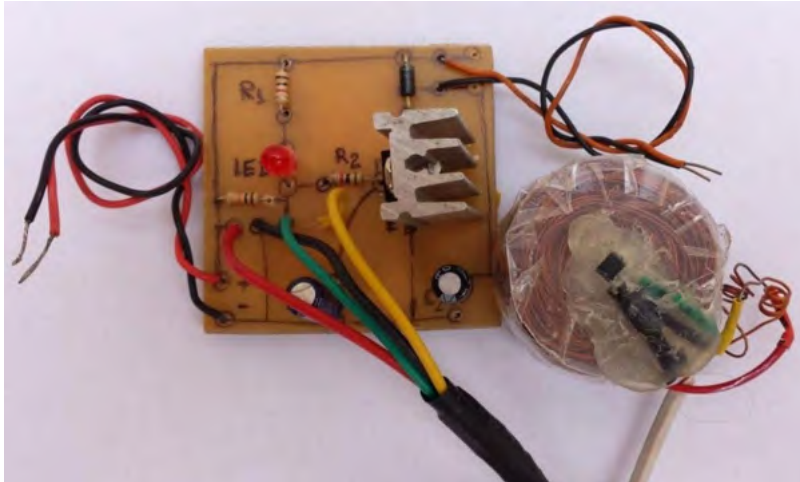


Figura 3 – Foto do circuito de acionamento de solenoide e o sensor de efeito Hall preso ao solenoide.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Estudo, análise e construção do solenoide

Conforme mostrado na figura 3, o solenoide é composto de 140 espiras de fio esmaltado 28 AWG enrolado em um suporte de cilindro de plástico oco de 4 mm² de diâmetro por 10 mm de comprimento perfazendo uma indutância de 160 μ H. Este solenoide produz um campo magnético é capaz de repelir e impulsionar o ímã ocasionando uma força capaz de acelerar o movimento do pêndulo.

Construção do pêndulo rígido

O pêndulo rígido foi montado em um suporte de madeira. Sua haste de um fio rígido de alumínio possui 125 mm de comprimento pendurado em um prego que permite que gire livremente com um mínimo de atrito. A foto da Figura 4 mostra o detalhe de construção deste pêndulo. Pode se observar ainda que existe um transferidor de plástico transparente que permite mostrar o grau de inclinação do pêndulo quando o mesmo estiver em movimento.



Figura 4 – Foto do pêndulo rígido pendurado em um prego

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Leitura de medidas do movimento do pêndulo

Para a leitura do movimento do pêndulo, foi realizado um estudo teórico prévio do movimento de um pêndulo rígido. Originariamente este estudo é baseado em um pêndulo simples com oscilações de pequenas amplitudes.

Um pêndulo simples consiste em um corpo de massa m , suspenso por um fio rígido de massa desprezível e comprimento L , que descreve um movimento oscilatório no plano vertical como mostra a Figura 5a. Sobre o corpo, atuam duas forças: o peso P , com a direção vertical, e a tensão T exercida pelo fio, com a direção do fio, tal como está representado na figura 5b (LUNAZZI, José J. Pendulo).

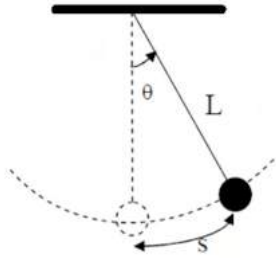


Figura 5a - Esquema de um pêndulo simples

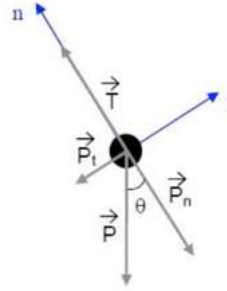


Figura 5b - Forças aplicadas em um corpo suspenso

Fonte: Pêndulo – Guia Laboratório – Trabalho nº 3 - ISEC

O período T_0 do movimento harmônico simples descrito pelo pêndulo é dado por:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (1)$$

Onde:

T_0 : Período do movimento angular

L: Comprimento do pêndulo

g: Aceleração da gravidade

Uma vez que a frequência f_0 é o inverso do período:

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \quad (2)$$

A frequência f_0 do movimento é dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (3)$$

O valor de aceleração da gravidade g pode ser calculado através da expressão:

$$g = 9.78032 - 0.1967 \times 10^{-5}h \quad (4)$$

Sendo h a altura em relação ao nível do mar onde se encontra o pêndulo para ser feita os ensaios de medidas. Considerando-se que o local onde foram efetuadas as medidas é 390 m então:

$$g = 9.78032 - 0.1967 \times 10^{-5} \times 390 = 9.77955 \text{ m/s}^2 \quad (5)$$

Frequência mensurada do pêndulo

O pêndulo tem o comprimento $L = 0.24$ m. Logo a frequência teórica deve ser de $f_{0T} = 1,0159\text{Hz}$. No procedimento experimental a frequência obtida foi de $f_{0p} = 1,0125$ Hz. Um erro experimental de 0,33% que pode ser considerado a leitura como bastante precisa.

Medidas de do ângulo θ em função da variação da tensão de fonte de alimentação do circuito do pendulo (V_F) e de corrente na bobona (I_B)

A variação do ângulo θ em função da tensão de fonte de alimentação se deve à energia gerada em forma de campo magnético que faz impulsionar o movimento do pêndulo causando um movimento acelerado fazendo que assim tenha um movimento contínuo intermitente. Quanto maior o valor desta tensão da fonte maior será o impulso dado ao pêndulo. Conseqüentemente, quanto maior a corrente aplicada na bobina I_B maior também será o ângulo θ .

Foram efetuadas medidas de angulo θ em graus em função da variação tensão da fonte de alimentação e de corrente na bobina I_B . Os resultados obtidos estão na Tabela 1 e seu gráfico nas Figuras 6 e 7.

Medida n°	V_F (V)	I_B (mA)	Ângulo θ (°)
1	1	8	5
2	2	16	6
3	3	24	8
4	4	32	10
5	5	40	12
6	6	48	15
7	7	56	18
8	8	64	21
9	9	72	25
10	10	80	29
11	11	88	33
12	12	96	37

Tabela 1: Medidas do ângulo θ (°) em função da variação da tensão de fonte de alimentação (V_F) e de corrente na bobina (I_B)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

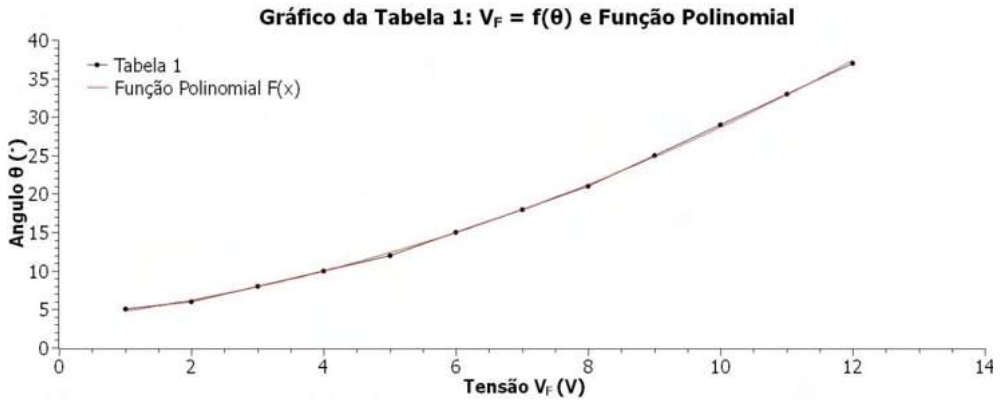


Figura 6 – Gráfico da variação do ângulo em função da variação da tensão de alimentação e também de sua correspondente função polinomial.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

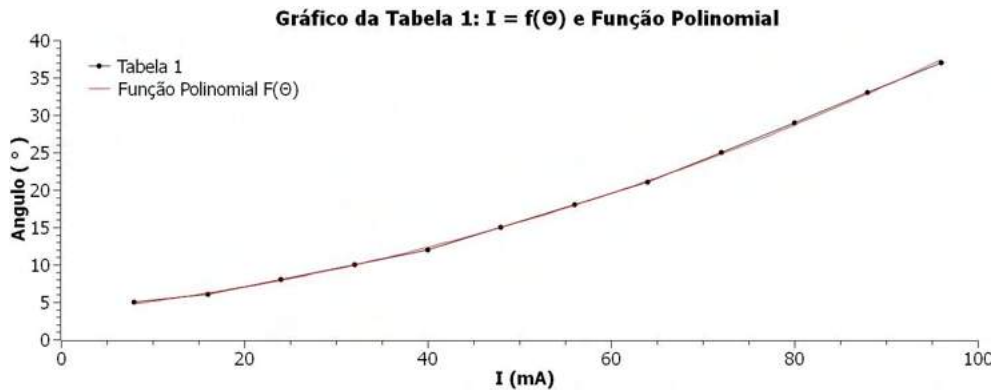


Figura 7 – Gráfico da variação do ângulo em função da variação da corrente aplicada na bobina e também de sua correspondente função polinomial.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Pode-se observar que ambos os gráficos são semelhante à medida que se aumenta a tensão da fonte, o que proporcionalmente irá aumentar a corrente aplicada na bobina.

Através da interpolação pelo software SciDavis obteve-se como resultado as equações de tensão $V = f(\theta)$ e $I = f(\theta)$:

$$V_F = 0.153\theta^2 + 0.964\theta + 3.659 \quad [V] \quad (6)$$

$$I_F = 3.659\theta^2 + 0.120\theta + 0.023 \quad [mA] \quad (7)$$

Estes resultados são importantes porque nos permite analisar o comportamento de diversos outros movimentos em condições análogas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostrou a possibilidade de confeccionar um pêndulo rígido de oscilações intermitente utilizando um circuito eletrônico com sensor de efeito Hall que pode ser utilizado para estudo e análise do seu comportamento físico, cálculo de altura de um determinado local em relação ao nível do mar através de medição da frequência de oscilação e em demonstrações de eventos científicos.

No resultado das medidas apresentadas, pôde-se constatar conforme esperado que a frequência de oscilação não depende da variação do ângulo ocasionado pela variação de tensão da fonte de alimentação. Esta variação está condicionada unicamente a aceleração da gravidade e do comprimento da haste do pendulo.

REFERÊNCIAS

BRAGA, Newton C. Como funcionam os sensores de efeito Hall (ART1050) Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-os-sensores-de-efeito-hall-art1050>> Acesso em: 21.09.2018.

GRIFFITHS, David J. Eletrodinâmica. 3ª ed. Traduzida. São Paulo. Editora Pearson. 1993.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. Fundamentos de Física 1: Mecânica. 3ª ed Traduzida. Rio de Janeiro. Editora Livros Técnicos e Científicos S.A. 1994.

LUNAZZI, José J. Pendulo. Tópicos de Ensino da Física II F709. IFGW. UNICAMP.2007.

MERIAM, James L; KRAIGE L G. Dinâmica. Mecânica para Engenharia. 6ª ed. Traduzida. Rio de Janeiro. Editora Livros Técnicos e Científicos S.A. 2009.

PENDULO – Guia de Laboratório, Trabalho nº 3 – ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

RAMSDEN, Edward. Hall Efect Sensor. Theory and Applications. 2ª ed. Editora Newnes. 2006.

TIPPLER, Paul A. Física para Cientistas e Engenheiros: Vol. 1 Mecânica. 3ª ed Traduzida. Rio de Janeiro. Editora Guanabara Koogan S.A. 1994.

SCIDAVIS, Tutorial do. UFMG, Departamento de Física, Laboratório de Introdução à Física Experimental. Disponível em < lilith.fisica.ufmg.br/~lab1/Tutorial_SciDAVis_bug.pdf > Acesso em 08.10.2018

Zilio S C; BAGNATO V S. Mecânica, Calor e Onda. Disponível em < <http://www.fisica.net/ondulatoria/Mecanica-Calor-Ondas.pdf>> Acesso em 22.09.2018

PANELES FOTOVOLTAICOS ADICIONALES A COLECTORES PARABÓLICOS PARA UN SISTEMA AUTÓNOMO DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR EN ZONAS TROPICALES

Data de aceite: 01/08/2022

Rosenberg J Romero

Centro de Investigación en Ingeniería y
Ciencias Aplicadas - UAEM
Cuernavaca, Morelos, México

Yuridiana Rocio Galindo Luna

Centro de Investigación en Ingeniería y
Ciencias Aplicadas - UAEM
Cuernavaca, Morelos, México
Universidad Autónoma Metropolitana-
Iztapalapa
Iztapalapa, Ciudad de México, México

Jesús Cerezo Román

Universidad Autónoma Metropolitana-
Iztapalapa
Iztapalapa, Ciudad de México, México

Moisés Montiel González

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, -
UAEM
Cuernavaca, Morelos, México

RESUMEN: Acondicionar aire o espacios, demanda grandes cantidades de energía eléctrica, para el funcionamiento de un componente mecánico común, conocido como compresor. Esta demanda energética afecta negativamente al ambiente y los costos al usuario, debido al funcionamiento de estos sistemas eléctricos, que dependen de la energía eléctrica doméstica, que en su mayoría es transformada por quema de combustibles fósiles. Los sistemas de absorción representan una

opción para sustituir a los sistemas conectados a la red eléctrica nacional, debido a que pueden usar energía solar (térmica y eléctrica) como fuente de potencia para su operación. El presente trabajo (en español) muestra el cálculo de las áreas térmicas y fotovoltaicas, para operar un sistema por absorción de vapor a partir de una solución acuosa de bromuro de litio. Los componentes del ciclo de absorción son bien conocidos en la literatura de ingeniería química e ingeniería mecánica: Generador, Condensador, Evaporador y Absorbedor; estos equipos son calculados considerando diseños de equipos comerciales de transferencia de calor, con la finalidad de que el sistema de aire acondicionado por absorción pueda ser reproducido con base en la disponibilidad de los componentes en las localidades donde desee instalarse. La planta térmica solar calculada es de 17 kW térmicos, con 15 concentradores cilíndrico-parabólicos (dispuesta en 3 líneas, con arreglo es serie, orientados Este- Oeste y con seguimiento Norte-Sur), 6 válvulas de seguridad, 2 sistemas de seguimiento (automático y manual) y 2 termo tanques de almacenamiento con capacidad de 300 litros cada uno. Los componentes de la instalación fotovoltaica son: paneles fotovoltaicos comerciales, interruptor termo magnético, controlador de voltaje, inversor y cableado. La planta fotovoltaica solar calculada es de 1.6 kW eléctricos, con 14 paneles fotovoltaicos en paralelo, sin seguimiento con estructuras fijas, orientadas a la latitud local sobre el muro sur de la construcción.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la demanda energética conduce al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a la quema de combustibles fósiles y esto contribuye al calentamiento global. Los seres humanos buscan mejorar su estilo de vida y su estado de confort, para tal fin; un número creciente de dispositivos y productos tecnológicos se introducen diariamente al mercado [Fan, 2007]. A nivel mundial, el sector eléctrico tiene como compromiso la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Ante esta situación todos los países deben impulsar la transición energética hacia un desarrollo sustentable, eficiente y menos dependiente de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica [SENER, 2015].

El 12 de diciembre de 2015, nació el Acuerdo de París cuyo objetivo es que todos los países se unan para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el CO₂ (Dióxido de carbono) y de esta manera reducir la contaminación ambiental producto de éstos.

El objetivo para el cual se enfoca dicho tratado es evitar el aumento a los 2°C de temperatura, esto debido a factores tales como aumento en el nivel del mar por derretimiento de glaciares mostrando un incremento de al menos 0.11°C por décadas, así como incremento en la acidificación de los océanos repercutiendo en la diversidad marina, cuyo agente causal es el CO₂.

Tomando en cuenta que los cambios por el calentamiento global son irreversibles, mediante negociaciones internacionales se acordó que las emisiones de CO₂ no sobrepasaran las 2,900 giga toneladas (Gt), aunque ya habían sido emitidas 1,900 Gt hasta el año 2011. Sin embargo, dicho impacto continuará por el resto de los años ya que no es posible detener las emisiones de GEI en general, por lo que se intenta reducir estas emisiones para evitar un incremento en la temperatura global de 1.5° C.

Desafortunadamente los combustibles fósiles constituyen un recurso no renovable y sus reservas han comenzado a agotarse alrededor del mundo. Generalmente es aceptado por la comunidad científica que su uso dentro de las actividades humanas está afectando al ambiente, debido a la emisión de gases de efecto invernadero [Obi, 2016], los cuales contribuyen con el calentamiento global.

TECNOLOGÍAS DE AIRE ACONDICIONADO

El aumento considerable de la temperatura por consecuencia del cambio climático ha originado que la sociedad utilice aire acondicionado siendo un consumidor de energéticos provenientes de fuentes no renovables, principalmente en México. De acuerdo a CIME Power Systems, una empresa con 70 años de experiencia en la ingeniería, en la tabla 1 recupera el consumo mensual kW/h de los aparatos de aire acondicionado antiguos, para el comparativo con los disponibles actualmente.

Aparato	Potencia (promedio) watts (w)	Tiempo de uso (periodos típicos)	Tiempo de uso al mes/hora	Consumo mensual kw/h
Aire lavado (cooler) grande	600	12 hrs. diarias	360	216
Aire lavado (cooler) mediano	400	12 hrs. diarias	360	144
Aire acondicionado de ventana 1 ton. antiguo	1850	10 hrs. diarias	300	555
Aire acondicionado de ventana 1 ton. nuevo	1200	8 hrs. diarias	240	288
Aire acondicionado de ventana 1.5 ton. antiguo	2250	10 hrs. diarias	300	675
Aire acondicionado de ventana 1 ton. nuevo	1800	8 hrs. diarias	240	432
Aire acondicionado de ventana 2 ton. antiguo	3200	10 hrs. diarias	300	960
Aire acondicionado de ventana 2 ton. nuevo	2450	8 hrs. diarias	240	588
Aire acondicionado dividido (minisplit) 1 ton.	1160	8 hrs. diarias	240	278
Aire acondicionado dividido (minisplit) 1.5 ton.	1680	8 hrs. diarias	240	403
Aire acondicionado dividido (minisplit) 2 ton.	2280	8 hrs. diarias	240	547
Calentador de aire	1500	4 hrs. diarias	120	180
Refrigeración central 5 ton. antiguo	7900	10 hrs. diarias	300	2370
Refrigeración central 5 ton. nuevo	5250	8 hrs. diarias	240	1260
Refrigeración central 3 ton. antiguo	4450	10 hrs. diarias	300	1335
Refrigeración central 3 ton. nuevo	3350	8 hrs. diarias	240	804
Refrigeración central 4 ton. antiguo	6500	10 hrs. diarias	300	1950
Refrigeración central 4 ton. nuevo	4250	8 hrs. diarias	240	1020

Tabla 1. Consumo eléctrico de aires acondicionado

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

La energía eléctrica ha mostrado un comportamiento el cual tiende a disminuir por el uso de combustibles fósiles, lo que se ha reflejado en un mayor desarrollo de energías renovables. Para poder hacerlo posible se toma en cuenta el alza en el precio de combustibles, su desarrollo, así como los costos en tecnología que permita la generación de dicha electricidad, por consiguiente, el impacto ambiental generado. [SENER, 2016]

Durante el año 2014, la generación de energía eléctrica fue de 301,462. GWh, para el año 2029 dicha tendencia estará en un aumento con un valor de 470,431.7 GWh representando el 56.1%. En este panorama tomando en cuenta los costos a mediano y largo plazo, la alternativa más considerable son las tecnologías de ciclo combinado; En donde el ciclo de turbina de gas (Brayton) a temperaturas superiores a 1,500°C y utilizar el gas de escape como fuente de energía para el ciclo de potencia de vapor con una

temperatura inferior a los 1,500°C. Con la finalidad de recuperar energía de los gases de escape y transferir al vapor en un intercambiador de calor que es utilizado como caldera. Obteniendo así una eficiencia por encima del 40% [Cengel, 2012]. Éste ciclo ocupa el 55.0% al término del año 2015.

La tecnología convencional se basa en quemar algún tipo de combustible fósil para producir vapor, el cual es turbinado para producir electricidad. Tales como: carbón, gas natural y fuelóleo. Se muestra un descenso de 12.4% a 0.5%. Así mismo, las carboeléctricas registran un descenso de 11.2% a 0.3%.

Mientras tanto del año 2014 a 2029 la energía hidroeléctrica mostrará un descenso con valor de 12.9% a 11.6% ya que el recurso hídrico es utilizado en gran medida para la generación de electricidad.

Aire acondicionado por absorción

La demanda energética asociada a los sistemas de aire acondicionado ha incrementado en recientes años [Xinwey, 2015]. La tecnología de bomba de calor tipo I, es capaz de realizar el efecto de enfriamiento y ser utilizada como sistema de aire acondicionado. Un sistema convencional de aire acondicionado es mostrado en la Figura 1, en la cual se observa el sistema que consiste en 4 componentes; evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión.

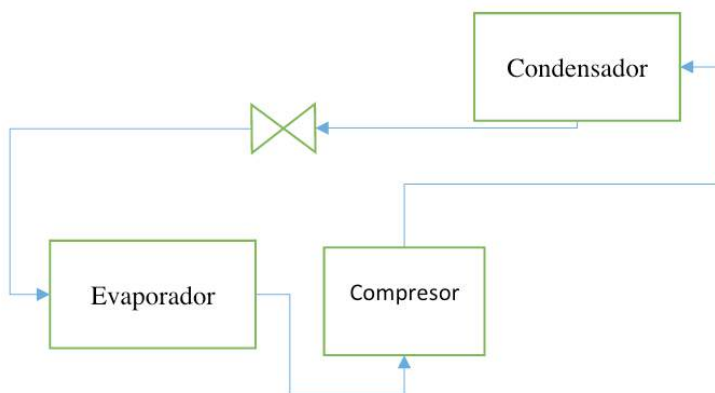


Figura 1. Diagrama esquemático de un ciclo comercial de compresión

El sistema de absorción sustituye el compresor por dos componentes: generador y absorbedor. Este sistema es mostrado en la Figura 2, en la cual podemos observar cuatro componentes: condensador, generador, evaporador y absorbedor.

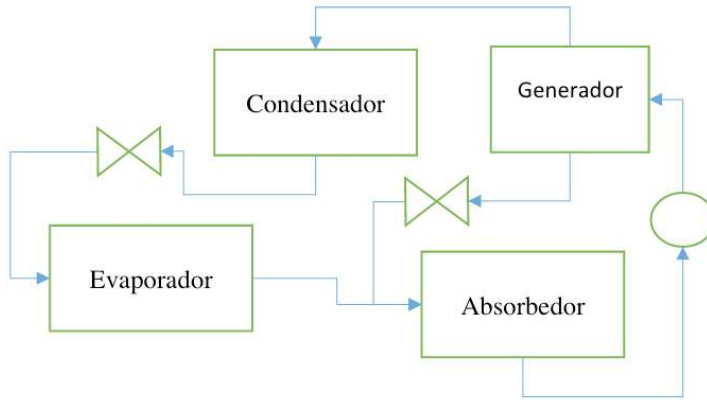


Figura 2. Diagrama esquemático de un ciclo de absorción

DISEÑO DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO FOTOVOLTAICO

El suministro eléctrico será por parte de módulos fotovoltaicos de la marca “Solartec S36PC-135 policristalino”. En la Figura 3 se muestra la ficha técnica, donde se puede observar que cada módulo tiene una potencia máxima a condiciones de prueba estándar de 135 W, un voltaje a circuito abierto de 22.5 V y corriente a corto circuito de 7.74 A.

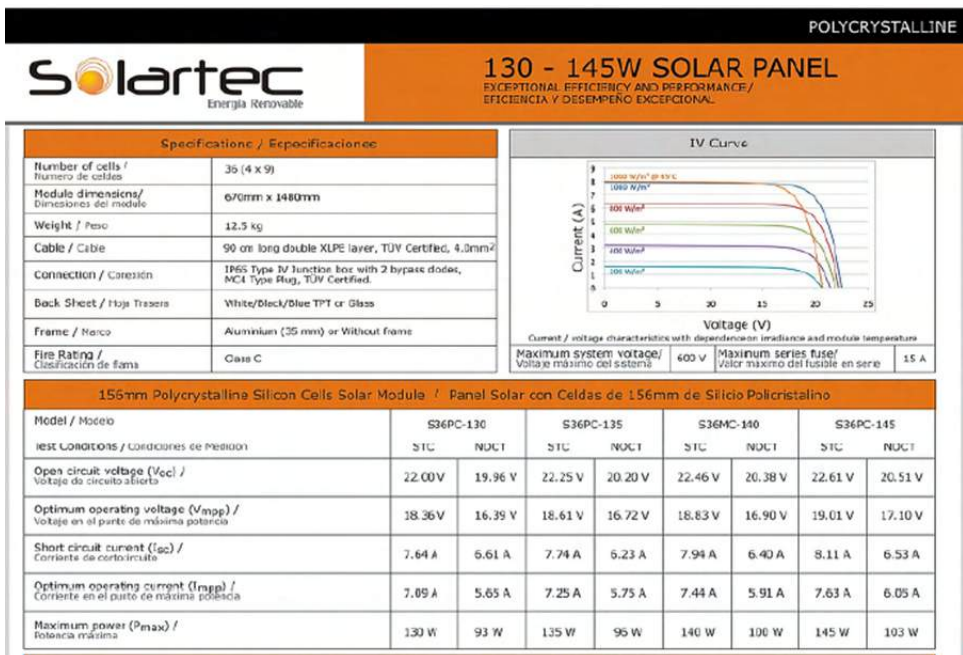


Figura 3. Ficha técnica del módulo fotovoltaico

En la figura 4 se muestra la forma de conexión eléctrica de todo el sistema de aire acondicionado por absorción autónomo.

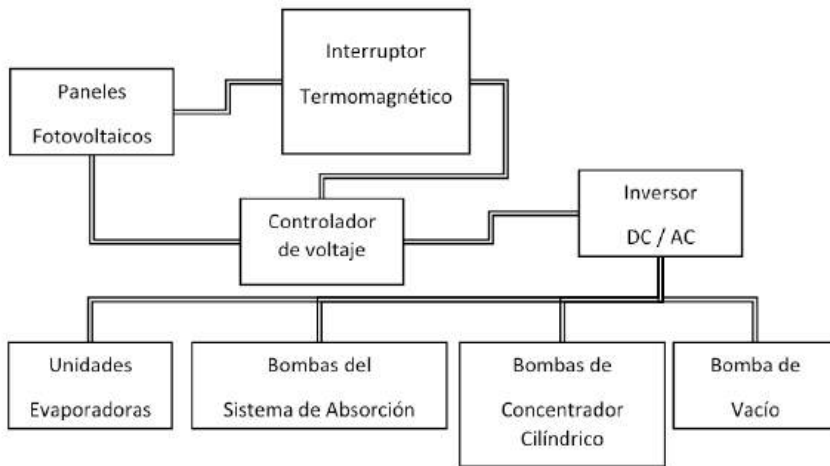


Figura 4. Diagrama esquemático de instalación del sistema fotovoltaico.

Evaluación de las necesidades energéticas

La determinación de las cargas eléctricas para el suministro del sistema de aire acondicionado solar se consideró sin control de seguimiento de los colectores solares y encendido con intervalos de tiempo como se presentan en la Tabla 2. La Bomba #1, # 2, #3 y #4 están conectadas al sistema de aire acondicionado por absorción (SAAA). Bomba #5 y #6 están conectadas al colector de canal parabólico (CCP). Los dispositivos con mayor demanda energética son las dos bombas conectadas al sistema de aire acondicionado de voltaje con corriente alterna (entre las dos requieren 2327.6 W), seguido de todas las unidades evaporadoras (operan con 1960.24W) y las dos bombas conectadas a los CCP (entre las dos demandan 1621.2 W). Como se puede observar la carga total fue de 6.6 kWh.).

Dispositivo	Cantidad	Potencia unitaria (W)	Operación (hora/día)	Energía consumida (W-h)
Bomba #1 *	1	264.5	4.50	1190.25
Bomba #2 *	1	264.5	4.30	1137.35
Bomba #3 **	1	63.6	4.83	307.19
Bomba #4 **	1	63.6	4.66	296.38
Bomba #5 *	1	140.0	5.83	816.20
Bomba #6 *	1	140.0	5.75	805.00
Unidad de evaporadora *	5	107.0	3.66	1960.24
Bomba de vacío *	1	172.5	0.16	27.60
Control del sistema *	1	10.0	6.00	60.00
Total				6600.2

Tabla 2. Cargas eléctricas de los dispositivos auxiliares sin seguimiento.

* Voltaje con corriente alterna

** Voltaje con corriente directa

La Tabla 3 muestra la demanda energética mensual y anual de acuerdo al mes que corresponde con seguimiento solar (SS) y sin seguimiento solar (NSS). Los meses que requerirían una aportación energética más alta son los meses de enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre con un valor de 204.61 kW-h sin seguimiento solar y 417.33 kW-h con seguimiento solar, ya que cuentan con un mayor número de días. Es importante resaltar que con el seguimiento solar la demanda eléctrica aumenta el doble al valor reportado sin el seguimiento solar.

Mes	Días	Demanda diaria sin seguimiento (kW-h)	Demanda (KW-h)	Promedio diario mensual (kW-h)	Demanda con seguimiento (kW-h)
Enero	31	6.6	204	13.5	417
Febrero	28	6.6	184	13.5	377
Marzo	31	6.6	205	13.5	417
Abril	30	6.6	198	13.5	404
Mayo	31	6.6	205	13.5	417
Junio	30	6.6	198	13.5	404
Julio	31	6.6	205	13.5	417
Agosto	31	6.6	205	13.5	417
Septiembre	30	6.6	198	13.5	404
Octubre	31	6.6	204	13.5	417
Noviembre	30	6.6	198	13.5	404
Diciembre	31	6.6	204	13.5	417

Anual	365		2408		4912
-------	-----	--	------	--	------

Tabla 3. Determinación de la demanda energética mensual y anual.

Energía solar aprovechable

La figura 5 muestra los valores de la radiación solar promedio mensual incidente en una superficie inclinada con un ángulo de 18° sobre las coordenadas de latitud 19° y longitud -99 , con base a los datos en la base de datos de la NASA. El valor de 19° se tomó de acuerdo al ángulo de la latitud más cercano a la que se encuentra la ubicación del proyecto. Cabe mencionar; que la base de datos de la NASA promedia el valor obtenido de radiación solar de 22 años en cada mes en el sitio seleccionado, con la cual se tiene la certeza de que los datos pueden usar para fines de este trabajo. El mes de menor irradiación es el de septiembre con un valor promedio de $5.46 \text{ kW-h} / \text{m}^2 / \text{día}$, debido a que típicamente es el mes de mayor nubosidad por el aumento de la intensidad de lluvias, presentando una disminución en la radiación incidente.

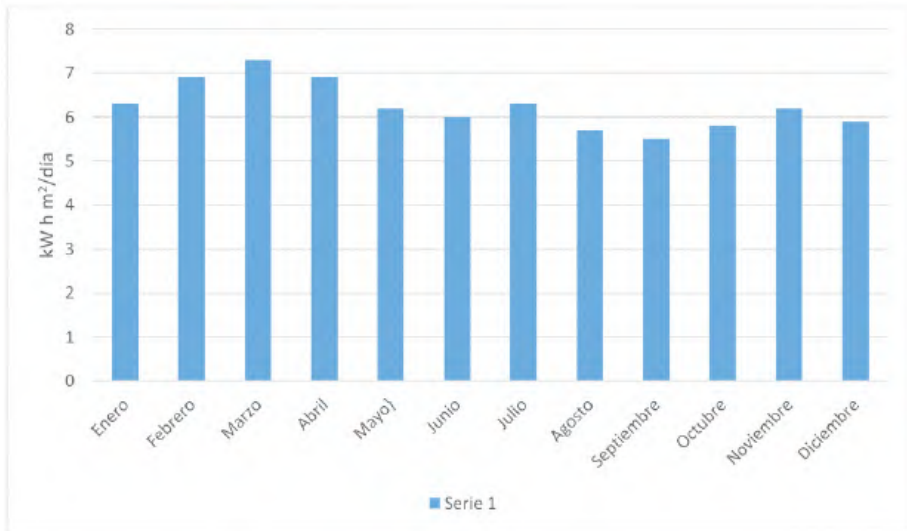


Figura 5. Radiación incidente promedio mensual en una superficie inclinada a 19° .

La Tabla 4 presenta el resultado de la energía eléctrica pico requerido de acuerdo a los datos del promedio diario de energía (PDE) y del recurso solar promedio mensual (RSPM), proporcionados en la Tabla 3 y Figura 5, respectivamente. El valor del PDE es multiplicado por 1000 y dividido por el valor del RSPM correspondiente a cada mes. El valor de la potencia pico requerida (PPR) es presentado en W y a modo de comparación de presenta los valores con seguimiento solar (SS) y sin seguimiento solar (NSS). Además, se aprecia que a pesar de que existen meses con mayor demanda energética (205 kW-h/mes ,

diciembre Tabla 3) el valor de la potencia requerida en septiembre es el mayor de todos con un valor de 1.2 kW, lo cual deberá ser cubierto por la fuente de energía renovable que se pretende diseñar. El valor de la potencia pico en septiembre es resultado de un menor recurso solar, comparándolo con el resto de los meses para la ubicación de 19 ° de latitud. Por lo anterior, se tomará este mes como el valor del recurso solar disponible para cubrir la demanda energética de todo el año.

Mes	RSPM (h)	PDE (kW-h)	PPR (W)	PDE SS (kW-h)	PPR SS (W)
Enero	6.3	6.6	1047	13.5	2143
Febrero	6.9	6.6	956	13.5	1957
Marzo	7.3	6.6	904	13.5	1849
Abril	6.9	6.6	956	13.5	1957
Mayo	6.1	6.6	1082	13.5	2213
Junio	6.0	6.6	1100	13.5	2250
Julio	6.3	6.6	1048	13.5	2143
Agosto	5.7	6.6	1158	13.5	2368
Septiembre	5.5	6.6	1200	13.5	2455
Octubre	5.8	6.6	1138	13.5	2328
Noviembre	6.2	6.6	1065	13.5	2177
Diciembre	5.9	6.6	1119	13.5	2288
Promedio	6.2		1064		2177

Tabla 4. Potencia pico requerida para cubrir la demanda con y sin seguimiento solar.

Eficiencia de los módulos fotovoltaicos

El cálculo del rendimiento del panel por influencia de la temperatura se basa en parámetros climatológicos del sitio y de las características eléctricas del panel seleccionado. En la Tabla 5 se muestran los parámetros que se usarán para el cálculo de la pérdida de rendimiento por temperatura de acuerdo a los datos del proveedor y a los datos meteorológicos del sitio.

Parámetro	Valor y unidades	Referencia
Temperatura máxima promedio del sitio (T _{máx})	21.2 °C	(Nasa, 2017)
Temperatura normal de operación del panel (TNOC)	45 °C (+/- 2°C)	(Solartec, 2017)
Coefficiente de temperatura de potencia máxima del panel ($\Delta P/\Delta T$)	-0.47 %/°C	(Solartec, 2017)

Tabla 5. Parámetros climatológicos del sitio y características eléctricas del panel fotovoltaico.

La ecuación 1 presenta el cálculo del coeficiente de operación (C1) tomando en cuenta el valor de TNOC para determinar el rendimiento teórico del panel fotovoltaico por influencia de la temperatura:

$$C1=(45^{\circ}\text{C}-20^{\circ}\text{C})/800 \text{ m}^2/\text{W}=0.03125 \text{ (}^{\circ}\text{C}^*\text{m}^2)/\text{W} \quad 1$$

Se prosigue con la determinación de la temperatura del panel fotovoltaico bajo las condiciones climatológicas del sitio, con la cual se conoce la temperatura teórica (Tc) que se encontrara la superficie del panel, como se aprecia en la ecuación 2:

$$Tc=21.2^{\circ}\text{C}+(0.03125 \text{ (}^{\circ}\text{C}^*\text{m}^2)/\text{W}^*1000 \text{ W}/(\text{m}^2)=) 52.45 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad 2$$

Este resultado nos indica que teóricamente la temperatura de la superficie de la celda aumentará 7°C respecto a la temperatura normal de operación, disminuyendo la eficiencia del panel. El valor obtenido es redondeado al número entero posterior que será de 53°C, con el fin de tener un margen de error, debido a que en la práctica la temperatura del panel puede aumentar o disminuir por la cantidad de radiación solar incidente en el momento. La ecuación 3 determina la diferencia de temperatura de la superficie del panel (ΔT) y la temperatura máxima promedio del ambiente. La ecuación 4 presenta el cálculo del producto del coeficiente de temperatura (ΔP) por la diferencia de temperatura con lo cual se obtiene la disminución del rendimiento esperado del panel fotovoltaico:

$$\Delta T=53^{\circ}\text{C}-21^{\circ}\text{C}=32 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad 3$$

$$\Delta P=(-0.47 \text{ } \%/ (^{\circ}\text{C}))^*32^{\circ}\text{C}=-15.04 \text{ } \%=0.1504 \quad 4$$

El valor obtenido es multiplicado por la potencia máxima del panel ($P_{\text{máx. teórica}}$), y restado por el mismo valor para conocer la potencia teórica máxima que puede proporcionar, tal como se muestra en la ecuación 5:

$$[P_{\text{máx}}]_{\text{teórica}}=(135\text{W}^*0.1504)-135\text{W}=114.70 \text{ W} \quad 5$$

Este valor es resultado de la posible disminución del voltaje de circuito abierto dentro del panel. A modo de comparación, en el trabajo de Chen et al. (2016) presentó un trabajo similar en el cual se observa una disminución lineal del Voc en un rango de temperatura en la superficie del panel de entre 15°C a 87°C, resaltando una mayor disminución de voltaje entre los valores de mayor temperatura. La posible causa es la diferencia entre la relación de los niveles de energía entre los donadores y aceptores de electrones por el aumento de la temperatura [Chen, 2016].

Eficiencia del regulador

Se colectaron los datos del voltaje del banco de la terminal del módulo (ValorBmódulo) y la terminal de las cargas (ValorBcarga) durante 5 días. A continuación, la Tabla 6., muestra los promedios obtenidos de voltaje en el regulador de voltaje, así como la eficiencia en cada día del mes de Mayo:

De acuerdo a los datos obtenidos, en promedio la eficiencia del regulador al transformar la energía fotovoltaica se encuentra en un 25% lo cual permitirá el funcionamiento del sistema con un voltaje nominal de 12 VCD.

Día	Valor B _{módulo} (V)	Valor B _{carga} (V)	Eficiencia (%)
22	18.96	14.40	75.94
23	19.26	14.43	74.92
24	19.30	14.46	74.92
25	19.36	14.43	74.53
26	19.44	14.43	74.22

Tabla 6. Valores promedios de voltaje obtenidos en 5 días y eficiencia del regulador

El dimensionamiento del SFV toma en consideración la pérdida de la eficiencia a través de los conductores, reguladores de voltaje e inversores de corriente. La ecuación 5 determinó la eficiencia total (E_{total}) considerando las pérdidas a través de los dispositivos eléctricos. Se consideran valores de eficiencia de los conductores de 0.97, eficiencia del regulador de voltaje de 0.98 y la eficiencia del inversor de 0.95 [Style, 2012]:

$$E_{total} = 0.97 * 0.98 * 0.95 = 0.90 \quad 6$$

Con este último valor y de acuerdo a la ecuación 6 se calcula la potencia pico (P_p) requerida por los paneles para poder cubrir de manera correcta la demanda energética sin considerar el seguimiento solar:

$$P_p = (6.60 \text{ kW} - h) / (5.46h * 0.85 * 0.9) = 1.58 \text{ kW} = 1575.53W \quad 7$$

El valor obtenido es dividido por la potencia de salida del panel fotovoltaico seleccionado, tal como se muestra en la ecuación 8, la cual determinó el número de paneles (N_p) para cubrir la demanda eléctrica, redondeando este valor al siguiente entero más cercano:

$$N_p = (1575.53W) / (114.70W) = 13.74 \approx 14 \text{ unidades} \quad 8$$

El número de paneles para cubrir la demanda eléctrica es de 14, los cuales deben de contar con una configuración específica. Como el sistema está compuesto por una potencia de 1.6 kW, el voltaje nominal será de 12 VCD. A modo de comparación la ecuación 9 muestra el cálculo de la potencia pico requerido (P_p) para cubrir la demanda tomando en cuenta el seguimiento solar y demás consideraciones.

$$P_p = (13.46kWh) / (5.46h * 0.85 * 0.9) = 3.21kW = 3209.99W \quad 9$$

El valor es dividido por la potencia de salida del panel fotovoltaico, determinando el número de paneles con seguimiento solar (N_{pss}) por la ecuación 10:

$$N_{pss} = (3209.99W) / (114.70W) = 27.95 \approx 28 \text{ unidades} \quad 10$$

Como se puede apreciar al comparar las ecuaciones 7 con 9 y 8 con 10, con base en el horario establecido en primera instancia y agregando el sistema de seguimiento, el número de paneles fotovoltaicos incrementa el doble.

Dimensionamiento de los reguladores, inversores y conductores

Con base en los resultados anteriores se determinó el número de reguladores de voltaje, los inversores de corriente haciendo una comparación entre el número resultante al

considerar el seguimiento solar y sin considerarlo, además del calibre de los conductores a utilizar.

Número de reguladores de voltaje

Con la ecuación 11 se determina la intensidad de corriente de entrada a los reguladores (I_{entrada}) de corriente con base en la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico “Solartec S36PC-135” el cual es de 7.74 A, los 14 paneles fotovoltaicos conectados en paralelo considerando el sistema sin seguimiento solar y un margen de seguridad de 1.25 para evitar sobrecargas y daños a los reguladores de voltaje:

$$I_{\text{entrada}}=1.25*14*7.74A=135.45A \quad 11$$

El valor obtenido incrementará el calibre de los conductores. Sin embargo, al considerar un voltaje nominal de 12 VCD para el funcionamiento de los dispositivos eléctricos, no fue posible cambiar la configuración del sistema fotovoltaico. El regulador de voltaje seleccionado es el “controlador automático de carga “GPC-12-30km”.

Mediante la ecuación 12 se calcula la corriente de salida de los reguladores de voltaje (I_{salida}) con base al producto de un factor de seguridad de 1.25, a la sumatoria de las potencias de cargas en CD, de un valor de 127.2 W, la sumatoria de las cargas en CA de 1526.5 W y dividido por la eficiencia del inversor de 0.95. El valor obtenido por último es dividido por el voltaje nominal:

$$I_{\text{salida}}=(1.25*(127.2W+(1526.5W)/0.95))/(12V)=180.63A \quad 12$$

El número de reguladores automáticos de carga ($N_{\text{reguladores}}$) estuvo definido por la corriente de entrada del regulador seleccionado de 30 A, entre la corriente de entrada como se aprecia en la ecuación 12:

$$N_{\text{reguladores}}=(135.45A)/(30A)=4.52\approx 5 \text{ unidades} \quad 13$$

El valor es redondeado al entero más cercano resultando en 5 reguladores de voltaje. Orozco Niveló et al., en el 2015 menciona que el correcto dimensionamiento del regulador de carga es importante para proteger las baterías y evitar algún daño a los dispositivos eléctricos. De acuerdo a los valores eléctricos del SFV, Voc de 32.13 y Isc 103.8, el regulador para cubrir cada ramal sería de 51.9 A, teniendo la capacidad de al menos 60 A para soportar la corriente en la entrada del regulador.

A modo de comparación en las ecuaciones 11 ($I_{\text{entrada}}[ss]$), 12 ($I_{\text{salida}}[ss]$) y 13 ($N_{\text{regulador}}[ss]$) se presenta el cálculo del número de reguladores tomando en consideración el seguimiento solar:

$$I_{\text{entrada}}[ss]=1.25*28*7.74A=270.9A \quad 14$$

$$I_{\text{salida}}[ss]=(1.25*(127.2W+(1526.5W)/0.95))/(12V)=180.63A \quad 15$$

$$N_{\text{reguladores}}[ss]=(270.9A)/(30A)=9.03\approx 10 \text{ unidades} \quad 16$$

De igual manera que el cálculo del número de paneles fotovoltaicos, el número de reguladores se dobla, agregando 5 unidades más para el SFV tomando en consideración el seguimiento solar.

Número de inversores

La ecuación 16 dimensionó la potencia que deberá cubrir el inversor (P_{inv}), tomando en cuenta la suma de las potencias de las cargas a corriente alterna de 1526.50 W, multiplicándolo por el “pico de arranque” de estos aparatos, aproximadamente de 4 veces su potencia nominal, y por el producto de un factor de seguridad de 1.2 con el objetivo de evitar daños al inversor:

$$P_{inv}=1.2*(4*1526.50W)=7327.20W \quad 17$$

El resultado obtenido es dividido entre la potencia del inversor seleccionado, en el caso de este trabajo fue de 1500 W, para conocer el número de inversores (N_{inv}) como se aprecia en la ecuación 17 y el valor obtenido es redondeado al número entero más cercano, quedando en 5 unidades. Las características eléctricas del inversor “Truper de 1500 W”.

$$N_{inv}=(7327.20W)/(1500W)=4.88\approx 5 \text{ unidades} \quad 18$$

A modo de comparación, se presenta en las ecuaciones 19 ($P_{inv[ss]}$) y 20 ($N_{inv[ss]}$) el cálculo del inversor considerando el seguimiento solar.

$$P_{inv}=1.2*(4*1706.5W)=8191.2W \quad 19$$

$$N_{inv}=(8191.2W)/(1500W)=5.46\approx 6 \text{ unidades} \quad 20$$

Como se puede apreciar con el seguimiento solar, tanto la potencia como el número de inversores también aumentan en una unidad más aumentando el costo del proyecto por cada unidad extra considerada para cubrir esa demanda y volviéndolo no viable, por lo tanto se seguirá con el cálculo sin considerar el seguimiento solar y un horario de 6 horas de operación.

Cálculo de conductores eléctricos

En la ecuación 21 se observa que la intensidad de corriente a través del cable ($I_{conductor}$) conductor fue el producto de los 14 paneles fotovoltaicos por la intensidad de corriente de cortocircuito de 7.74 A, por un margen de seguridad de 1.1:

$$I_{conductor}=1.10*(14*7.74)=119.20A \quad 21$$

Considerando que los conductores en CD deben conectar los paneles con los 5 reguladores calculados y que la distancia más larga entre los paneles y el centro de carga es de 9 metros, la Tabla 7., engloba los parámetros utilizados para el cálculo de la sección transversal del conductor:

Parámetro	Valor y unidades
Longitud del cable	9 metros
Intensidad de corriente entre los 5 reguladores de voltaje	23.84 A
Voltaje nominal	12 V
Caída de Tensión según Tabla 2.2.	0.03
Conductividad del cable de cobre	56 m/Ohm*mm ²

Tabla 7 Parámetros eléctricos para el cálculo de la sección transversal en CD

El calibre de los conductores (S) en voltaje CD, se determina como se aprecia en la ecuación 21:

$$S = 2 * (9m * 23.84A) / (56m / (\Omega \cdot [mm]^2) * (12V * 0.03)) = 2 * (214.55A * m) / (20.16(m * A) / [mm]^2) = 21.29 [mm]^2 \quad 22$$

Se necesitaría un cable de calibre A.W.G. #4 para soportar la corriente y la distancia a recorrer. Por otro lado, para determinar el calibre de los conductores que alimentan a los inversores y a los dispositivos eléctricos se tomará en cuenta la resistencia e intensidad de corriente por transportar teniendo en cuenta la caída de voltaje. A continuación, en la Tabla 8., se muestran los parámetros utilizados:

Parámetro	Valor y unidades
Longitud del cable	50 metros
Potencia del SFV	1575.54 W
Voltaje entre fase y neutro	127.5 V
Caída de voltaje según Tabla 7.2 de apéndice	0.02 de 127.5 V = 2.55 V
Factor de potencia (considerando un promedio de aprovechamiento de la energía)	0.8

Tabla 8 Parámetro eléctricos para el cálculo de la sección transversal en CA.

Con base a los datos de la Tabla 8., se calculó la intensidad de corriente (I) que se conducirá a través de estos, tal como se aprecia en la ecuación 23:

$$I = (1575.54W) / (127.5V * 0.8) = 15.45A \quad 23$$

Con la ecuación 24 se determinó la resistencia (R) necesaria en 50 metros para tener una caída de voltaje máxima de 2.55 V entre la intensidad de corriente obtenida en la ecuación 23:

$$R = (2.55V) / (15.45A) = 0.17\Omega \quad 24$$

Como la resistencia está dada en Ohms/km, se hace un ajuste para calcular la resistencia entre kilómetro necesario de los conductores (x) para determinar el calibre

correspondiente, de acuerdo a la ecuación 24:

$$X=(1000*0.17\Omega)/50=3.42\Omega km \quad 25$$

Se seleccionó un valor de resistencia ligeramente menor deduciendo que el conductor requerido para este trabajo es del calibre A.W.G. #10. La posible causa del calibre a seleccionar se debe a que se busca que la caída de voltaje máxima sea menor a la permitida con el objetivo de evitar daños a los dispositivos eléctricos del sistema fotovoltaico y auxiliares del aire acondicionado por absorción (Becerril L. 2002).

Configuración del sistema fotovoltaico

Con la ecuación 26 se obtuvo el número de paneles conectados en serie (N_{ps}) de acuerdo a las consideraciones que se tiene para este proyecto dividiendo el valor del voltaje nominal y el voltaje óptimo de operación del panel seleccionado, en este caso de 18.6 V, y redondeando ese valor al entero próximo más cercano:

$$N_{ps}=(12V)/(18.6V)=0.65=1 \text{ fila} \quad 26$$

Con base en el número de filas de la ecuación 26, ahora se determina el número de paneles fotovoltaicos conectados en paralelo (N_{pp}) con la ecuación 27:

$$N_{pp}=14/1=14 \text{ columnas} \quad 27$$

La Figura 6 muestra la configuración del sistema fotovoltaico de acuerdo a los cálculos anteriores, quedando en una configuración de 1 fila conectada en serie y 14 columnas en paralelo para aumentar la intensidad de corriente y mantener el voltaje igual. Cabe mencionar que el sitio donde se instalarán las tecnologías cuenta con 14 metros de ancho por 5 metros de largo resultando en un área de 70 m². Sin embargo, esta área estará ocupada tanto por un conjunto de concentradores cilíndrico-parabólicos, un Sistema de aire acondicionado por absorción compuesto por un generador, condensador, evaporador y absorbedor, así como de los dispositivos auxiliares que permitirán el desplazamiento del fluido a través de ambos. Esta condición limita al conjunto de paneles fotovoltaicos para ser instalados sólo en el muro con orientación hacia el sur geográfico y con una inclinación igual a la latitud del sitio de operación, en este caso, el ángulo de inclinación es de 19°, con el objetivo de aprovechar la radiación solar en el verano donde la temperatura ambiente es mayor y los espacios a acondicionar aumentan su temperatura. Otra razón por la que se decidió instalar el conjunto de paneles en el muro sur se debe a que permite disminuir las cargas térmicas de los espacios al reducir estas cargas por el sombreado que proporcionan los paneles fotovoltaicos.

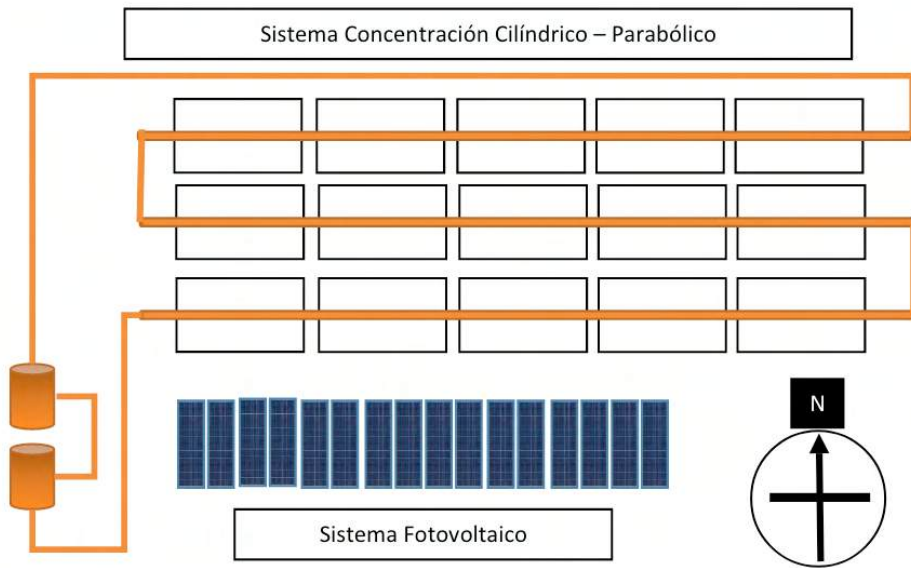


Figura 6. Configuración esquemática del sistema de enfriamiento solar autónomo.

Descripción del Sistema de Concentración Solar

Los avances tecnológicos y el crecimiento económico de los países se encuentran basados en la energía. El aumento en la demanda energética conduce al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye al calentamiento global. Un ascenso en la temperatura promedio global impacta en el aumento del uso de sistemas de aire-acondicionado y contribuye a la aceleración de la demanda energética [Ali, 2014]. A finales de 1980, se estimó que las emisiones de estos refrigerantes por sistemas de refrigeración durante el funcionamiento representaron el 33.3% de los gases de efecto invernadero [Edminds, 1987]. Un sistema de aire-acondicionado por absorción utiliza fluidos refrigerantes más amigables al medio ambiente. Una bomba de calor tipo I, es capaz de extraer energía térmica de un espacio, provocando el efecto de enfriamiento. Esta tecnología es utilizada para procesos de refrigeración y aire acondicionado. La configuración del aire-acondicionado por absorción consiste en un generador, condensador, evaporador y absorbedor. El ciclo termodinámico es descrito a continuación: Al generador (QGE) es suministrada energía para separar el fluido refrigerante de la mezcla de trabajo, compuesta por un refrigerante y un absorbente a alta temperatura y presión. El refrigerante en fase vapor es dirigido al condensador (QCO) donde cambia de fase a líquido; cediendo su calor al ambiente. Este refrigerante líquido pasa a través de la válvula de expansión para obtener una mezcla líquido-vapor a baja presión y temperatura. Luego es llevado al evaporador (QEV) donde absorbe una determinada carga térmica proveniente de un espacio; logrando así el efecto de enfriamiento, lo anterior provoca un cambio de líquido a vapor. Este vapor es

llevado al absorbedor (QAV) para ser absorbido en una mezcla concentrada en absorbente, provocando una reacción exotérmica que libera calor. Finalmente, la mezcla diluida en absorbente es bombeada al generador; para iniciar el ciclo, la Figura 7 muestra el diagrama esquemático de este sistema.

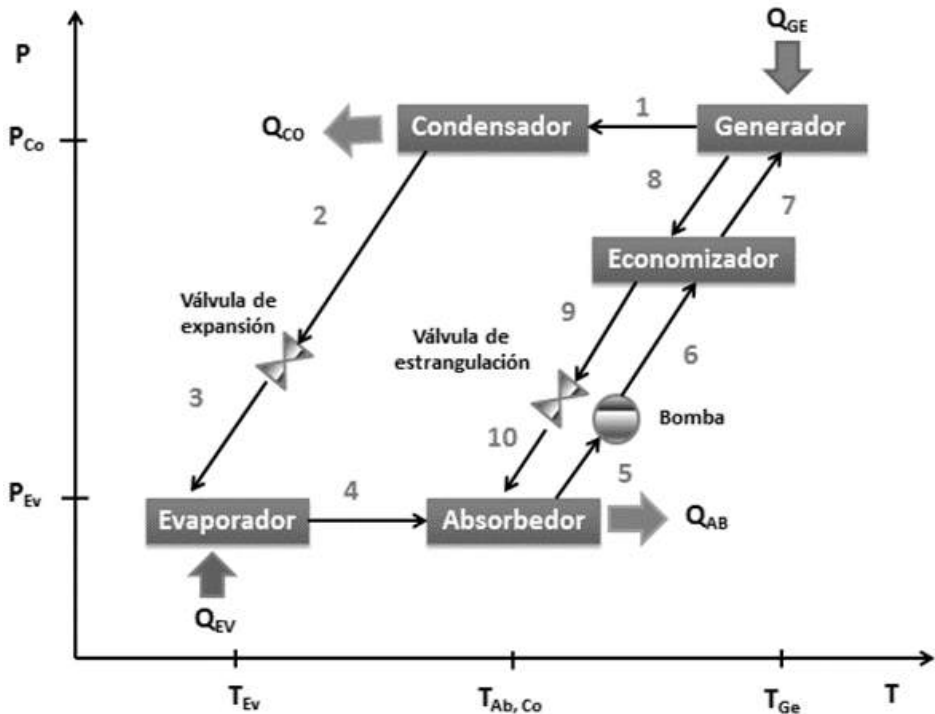


Figura 7. Diagrama esquemático de un aire acondicionado por absorción.

Un sistema de este tipo reduce el consumo eléctrico debido a que la energía suministrada al generador puede provenir de calor residual de las industrias, biomasa, ciclos Rankine o con energía solar térmica [Hernández - Magallanes, 2014]. Esta última opción, parece la más viable ya que la energía solar se encuentra naturalmente disponible, es limpia y gratuita [EBRD, 2010]. Diversos trabajos sobre acoplamientos de plantas de colectores solares a sistemas de aire-acondicionado por absorción han sido reportados: Sumathy et al. [Sumathy, 2002] reporta un sistema de aire-acondicionado por absorción localizado en Shenzhen China, utilizando la mezcla LiBr-H₂O. Este sistema fue utilizado para acondicionar 80 m², usando tres tipos de colectores: cilindro-parabólicos con un área de apertura de 38 m², tubos evacuados con 38 m² y colectores de placa plana de tubos evacuados con 41 m². Dos sistemas chillers marca Yazaki WFC-600 con capacidad de 7kW cada uno. Dos tanques para almacenamiento de agua con volumen de 5 m³. El acoplamiento alcanzó un COP en un rango de 0.31-0.39 y una temperatura de agua en el

chiller de 9 °C. De Francisco et al. [De-Francisco, 2002] desarrolló y operó un prototipo de absorción utilizando la mezcla H₂O-NH₃ para algunas operaciones de grupos rurales. Este sistema fue acoplado a colectores cilindro-parabólicos y aceite térmico como fluido de trabajo. El condensador y el absorbedor son equipos de tubos aletados. El generador y evaporador fueron intercambiadores tubulares comerciales. La temperatura alcanzada en el evaporador fue de 10°C y el COP máximo de 0.05. El presente trabajo muestra el diseño y la construcción de una planta de concentradores cilindro-parabólicos que funcionen como fuente térmica para alimentar un sistema de aire-acondicionado por absorción, como el mostrado en la Figura 8. Esta, muestra la planta de colectores cilindro parabólicos conectados en serie, donde E1 indica la entrada del fluido de trabajo a la primera fila y S3, la salida hacia los tanques de almacenamiento. El acoplamiento de estas tecnologías fue analizado mediante un análisis teórico.

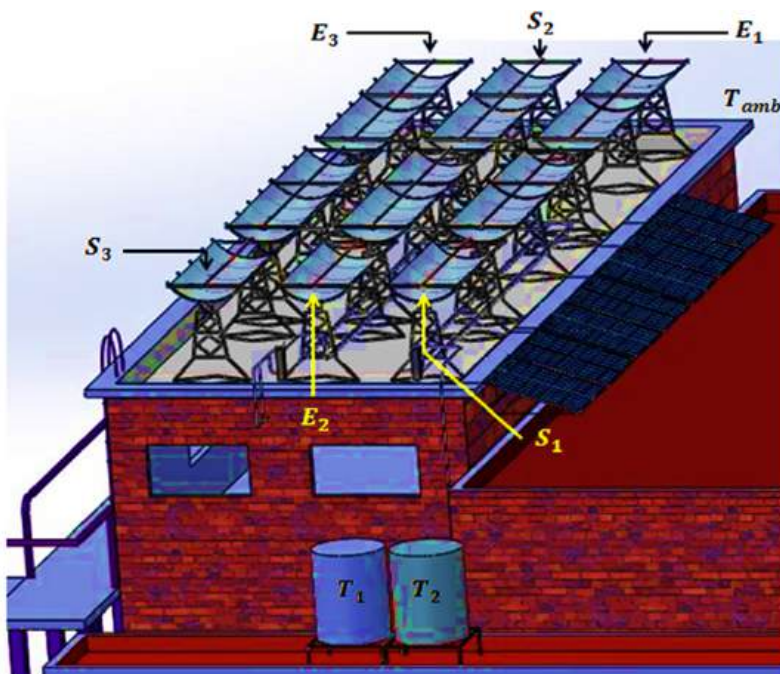


Figura 8. Diagrama esquemático de la planta de colectores cilindro parabólicos.

Balances de Energía

Los balances de materia y energía para cada componente son presentados a continuación:

$$Q_{GE} = m_1 h_1 - m_8 h_8 - m_7 h_7 \quad 28$$

$$Q_{CO} = m_1 (h_1 - h_2) \quad 29$$

$$Q_{EV} = m_1 (h_4 - h_3) \quad 30$$

$$Q_{AB} = m_{10} h_{10} + m_4 h_4 - m_5 h_5 \quad 31$$

$$Q_{EC} = m_5 (h_6 - h_7) \quad 32$$

$$COP = Q_{EV} / (Q_{GE} + W_p) \quad 33$$

El coeficiente de operación (COP) expresa la relación que existe entre el calor útil y la energía que se suministra al sistema, el término W_p en este caso no se considera despreciable, debido a que el trabajo de la bomba es cercano al 10 % de la carga del generador.

Parámetros geométricos del Concentrador Cilindro-Parabólico (CCP)

Un concentrador cilindro parabólico (CCP) transforma la radiación solar en energía térmica. El tubo receptor se encuentra ubicado en la línea focal del CCP, dentro del cual fluye el fluido de trabajo, absorbiendo la energía solar concentrada en las paredes de la tubería y aumentando su entalpía. Este tipo de concentrador requiere de un sistema de seguimiento solar en un eje, es decir, se orientan hacia el Sur o hacia el Este geográfico y se implementa un seguimiento Este-Oeste, o bien, un seguimiento Norte-Sur, según la orientación definida como fija.

El dimensionamiento de los colectores fue calculado mediante los modelos reportados en la literatura [Venegas-Reyes, 2012,7; Jaramillo, 2013]. Se consideró un ángulo de borde de 90° ($\phi_r = 90^\circ$) y una longitud de apertura $W_a = 1.05$ m, la ecuación 34 nos permite determinar la apertura de la parábola como sigue:

$$W_a = \frac{2 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)}{\sec\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) + \ln\left(\sec\left(\frac{\phi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)\right)} \quad 34$$

La distancia focal (f) [Kalogirou, 2013]:

$$f = \frac{W_a}{4 \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \quad 35$$

Y la razón de concentración geométrica de un CCP es calculada como:

$$C = \frac{W_a}{\pi D_o} \quad 36$$

Donde D_o es el diámetro exterior del tubo receptor. En este caso se consideró un tubo comercial de cobre de 1 pulgada ($D_o = 2.54$ cm). La tabla 9 muestra las principales características de los concentradores utilizados en este trabajo.

Para la implementación de la planta piloto de 17 kW térmicos se utilizaron láminas de alta reflectividad, Alanod 4270AG21 (92 % de reflectividad, reportada por el fabricante),

Parámetro	
Longitud (m)	4.88
Ancho (m)	1.05
Área de apertura (m ²)	5.124
Ángulo de borde (°)	90
Diámetro externo (mm)	25.4
Diámetro interno (mm)	19.05
Orientación	Norte-Sur
Seguimiento	Este-Oeste

Tabla 9. Características del Concentrador Cilíndrico Parabólico

El diseño mecánico propuesto es ligero, estructuralmente rígido, de fácil ensamble y de bajo costo. Las bases de los concentradores fueron tomadas del modelo propuesto por Venegas [Venegas, 2012] y modificadas para las condiciones de uso requeridas (Figura 9). El material utilizado para la fabricación de las estructuras de soporte es PTR. Los perfiles parabólicos fueron fabricados de aluminio colado y rectificados en una máquina CNC, cada concentrador posee 9 perfiles, sobre los que descansa la lámina de aluminio de alta reflectividad.

El mecanismo de seguimiento corresponde a un sistema pasivo, de componentes ligeros y fabricados en el taller mecánico. Este sistema permite que los concentradores sigan el curso aparente del sol, para lograr captar la mayor cantidad de rayos durante el día. Para lograr la movilidad de los CCP se utilizan rodamientos instalados en los extremos superiores de cada concentrador, el cual se puede observar en la Figura 9. Dentro de los rodamientos fueron ensamblados los tubos de sujeción de 4 pulgadas de diámetro, para unir los colectores en 3 líneas.

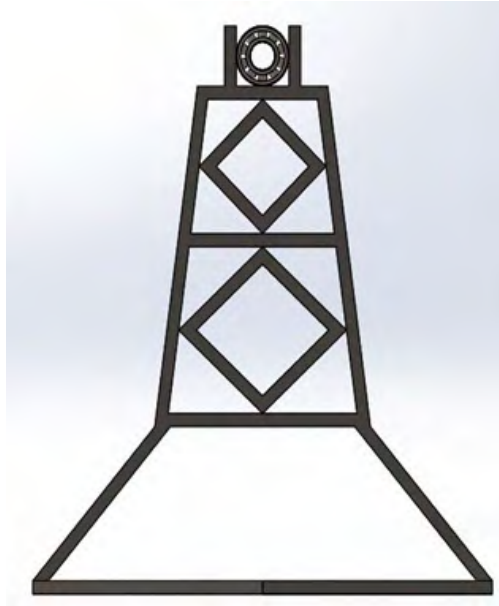


Figura 9. Base del concentrador y rodamiento.

La lámina debe descansar sobre un perfil parabólico, el cual se construyó ensamblando 5 perfiles parabólicos de aluminio al tubo de sujeción como el mostrado en la Figura 10.

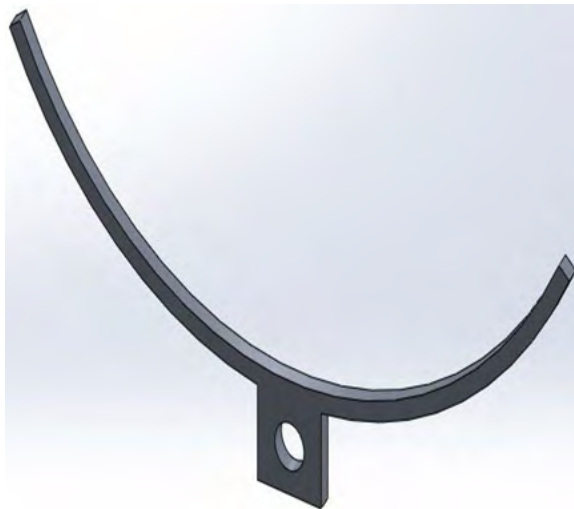


Figura 10. Perfil parabólico.

El elemento receptor es un tubo comercial de cobre de 2.54 cm (1 pulgada) de diámetro externo y 2.5 m de longitud. Para lograr unir los receptores a lo largo de la fila,

fueron conectados mediante manguera de alta temperatura, con revestimiento metálico.

Ensamblado del CCP

El ensamble de los componentes fue realizado de manera manual y se inicia por orientar las bases Norte-Sur, para después instalar los rodamientos en los extremos, donde será colocado el tubo de sujeción que brinda el soporte horizontal. Los perfiles parabólicos son montados sobre el soporte, nivelados y fijados con pernos roscados. Finalmente, la lámina de aluminio es colocada sobre los perfiles parabólicos para tomar la forma, una vez que se encuentra perfectamente nivelada se pega y asegura usando remaches en los extremos sobre los perfiles parabólicos.

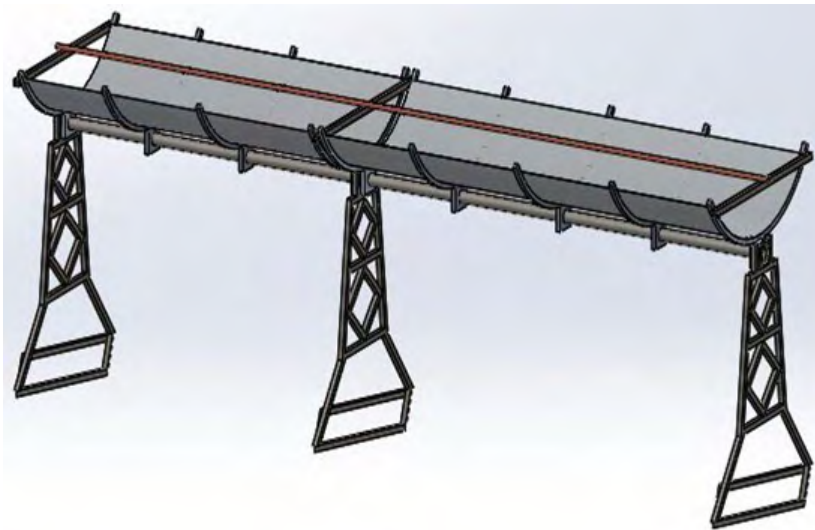


Figura 11. Concentrador cilindro-parabólico ensamblado

CONDICIONES DE OPERACIÓN CON BROMURO DE LITIO

Los colectores cilindro-parabólicos con las siguientes dimensiones: longitud 4.88 m, ancho 1.05, área de apertura 5.124 m², considerando un ángulo de borde de 90° y con seguimiento Norte-Sur. Se realizó el acoplamiento teórico entre estas dos tecnologías, considerando 9 concentradores. De acuerdo con los resultados el ciclo es capaz de operar con temperaturas de alimentación en un rango de 85 a 95°C, el COP máximo esperado posee un valor de 0.97 con una temperatura de alimentación de 95°C, mientras que los COP mínimo calculado es 0.66, considerando 85°C. $T_{Ev}=10^{\circ}\text{C}$ y las correspondientes al absorbedor y condensador con variación en un rango de 30 a 45°C. (Esto fue para hidróxidos, haré la simulación con bromuro de litio).

El acoplamiento de los ciclos de absorción y el uso de colectores para su funcionamiento presenta una opción viable para cubrir la demanda de preservación de

alimento y confort humano, al mismo tiempo que se protege al medio ambiente.

En la literatura clásica del tema, se han reportado como los sistemas de absorción dependen de las propiedades físicas, químicas y termodinámicas de la mezcla de trabajo [Pérez - Blanco, 1984]. La mezcla de trabajo está constituida por un refrigerante y un absorbente, en algunos artículos y libros especializados, se le llama mezcla o par de trabajo, ya que están formados de un absorbente y un soluto.

Un requisito fundamental de esta mezcla de trabajo es que debe ser químicamente estable, no tóxico y no explosivo. Además, la mezcla de trabajo debe cumplir con los siguientes requisitos:

- a) La diferencia entre el punto de ebullición del refrigerante puro y la mezcla a la misma presión debe ser la más alta posible.
- b) El refrigerante debe contar con un calor de vaporización alto relativo a la mezcla y una concentración alta dentro del absorbente, para mantener una velocidad de circulación baja entre el generador y el absorbedor por unidad de capacidad de enfriamiento.
- c) Las propiedades de transporte que influyen en la transferencia de calor y masa, por ejemplo: viscosidad, conductividad térmica y coeficiente de difusión deben ser favorables.
- d) Tanto el refrigerante como el absorbente deben ser no corrosivos, respetuosos del medio ambiente y de bajo costo, para cualquier tipo de sistema por absorción desde sus propuestas iniciales [Holmberg, 1990].

Desde la invención de los sistemas de refrigeración por absorción, la mezcla NH_3 - H_2O ha sido ampliamente utilizada. Tanto el amoníaco como el agua son estables en un amplio rango de operación de temperatura y presión. NH_3 es considerado un refrigerante viable debido a su alto calor latente de vaporización y su punto de congelación de -77°C [El-Sayed, 1985]. Sin embargo; la combinación del amoníaco con el aire es inflamable en una concentración del 25%, la toxicidad que presenta, el ataque por corrosión y la necesidad de un sistema adicional denominado rectificador [Steiu, 2009], incrementa el costo del sistema de absorción.

La mezcla H_2O - LiBr posee una diferencia considerable entre los puntos de ebullición del agua y el bromuro de litio. Cuando el agua es utilizada como fluido refrigerante, la temperatura del evaporador no debe estar por debajo de los 5°C , los sistemas son operados con bajas presiones y presentan riesgo de cristalización sobre el 70% de concentración en peso de bromuro de litio [Sun, 2012].

El cálculo de condiciones se realizó para una potencia de generación, aportada por los colectores solares y una potencia de bombeo para los sistemas de circulación de fluidos del 10 %

Efectos de los componentes

Se pueden observar dos grandes efectos del sistema de aire acondicionado por absorción: efectos asociados a la temperatura del ambiente y efectos asociados a la radiación solar.

En el caso de los efectos de la temperatura podemos identificar dos: efecto de la temperatura del ambiente en el condensador y efecto de la temperatura del ambiente en el concentrador solar que suministra energía al generador.

Efecto en el condensador

Para evaluar el funcionamiento del sistema, se parametriza al Coeficiente de Operación, definido anteriormente. La relación entre la energía suministrada por los concentradores solares y paneles fotovoltaicos se encuentran en el denominador y la energía de los evaporadores, que es el efecto de acondicionamiento del aire a la menor temperatura posible, se encuentra en el numerador.

En la figura 12 se puede observar cómo a medida que se incrementa la temperatura del condensador, el coeficiente de operación muestra una variación. Esta variación negativa al aumentar la temperatura del condensador tiene un efecto adicional por la propia temperatura del ambiente que puede hacer que la temperatura del absorbedor (ambos enfriados por la atmósfera) pueden disminuir el Coeficiente de Operación.

En la figura, se puede observar que el incremento de la temperatura del ambiente afecta negativamente la operación del aire acondicionado.

Si el sistema opera con una temperatura del condensador cercana a los 25 °C, el COP si se desprecia la energía de bombeo es de 0.86 y se incluye la energía de bombeo el COP disminuye a 0.78.

Esto significa que para el sistema diseñado de 17 kW en el generador, suministrado por los concentradores solares a 70 °C y enfriando agua a 10 °C, se obtendrá una potencia de aire acondicionado de 14.6 kW (4.1 toneladas de refrigeración, en términos comerciales).

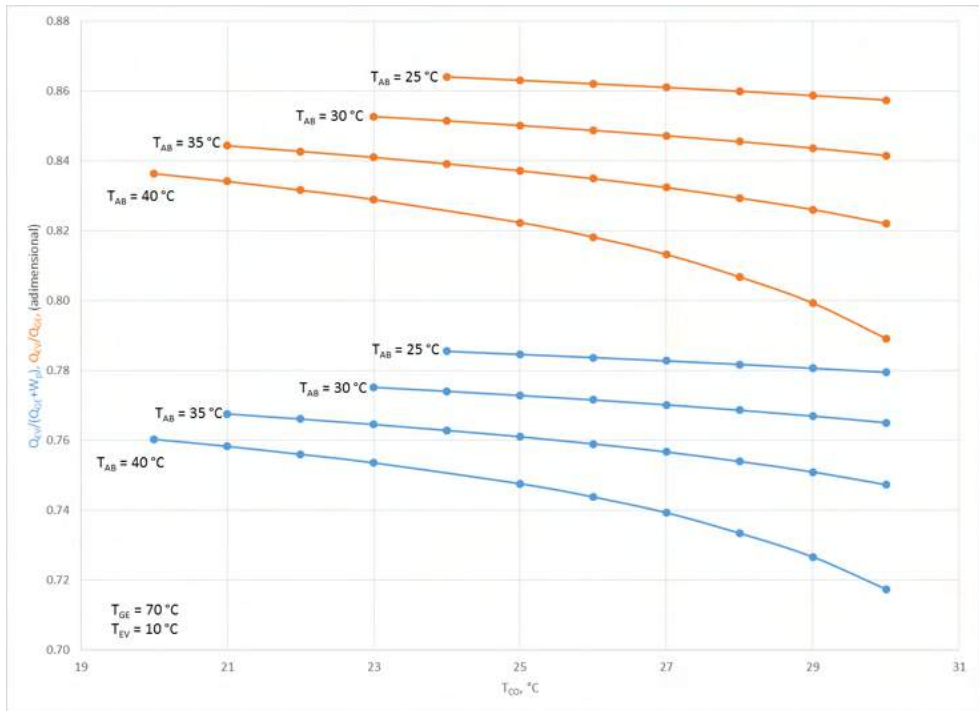


Figura 12. Efecto de la temperatura del condensador en el Coeficiente de Operación.

Efecto en el generador

En el caso de las variaciones de la radiación, la energía concentrada genera una variación de la temperatura en los concentradores y no necesariamente es positiva. Esto es notorio porque el incremento de la temperatura en el generador implica que para un flujo constante no se está transfiriendo mayor energía. Y lamentablemente, para el caso del par bromuro de litio - agua, puede conducir a la cristalización, inutilizando al generador y eventualmente conducir solución concentrada al absorbedor.

En la figura 13 se puede observar que el incremento de temperatura no conduce a una mayor generación de vapor si la temperatura del condensador es constante.

En esta figura se puede observar que las variaciones de temperatura en el condensador un par de centígrados prácticamente no modifica el valor del COP.

Si se tiene temperatura de 70 °C en el generador, proveniente de los concentradores cilíndrico parabólico, para una temperatura de evaporación de 15 °C, el COP sin considerar la energía de bombeo es al rededor de 0.88.

Esto significa, en términos prácticos para el equipo diseñado, que los 17 kW de energía solar son capaces de transferir 14.9 kW para el acondicionamiento de aire. Esto comercialmente es 4.3 toneladas de refrigeración.

En el caso de incluir la energía de los paneles fotovoltaicos el Coeficiente de

Operación disminuirá a 0.79 y prácticamente no cambiaría este valor si hay variaciones de un par de centígrados en la temperatura del generador.

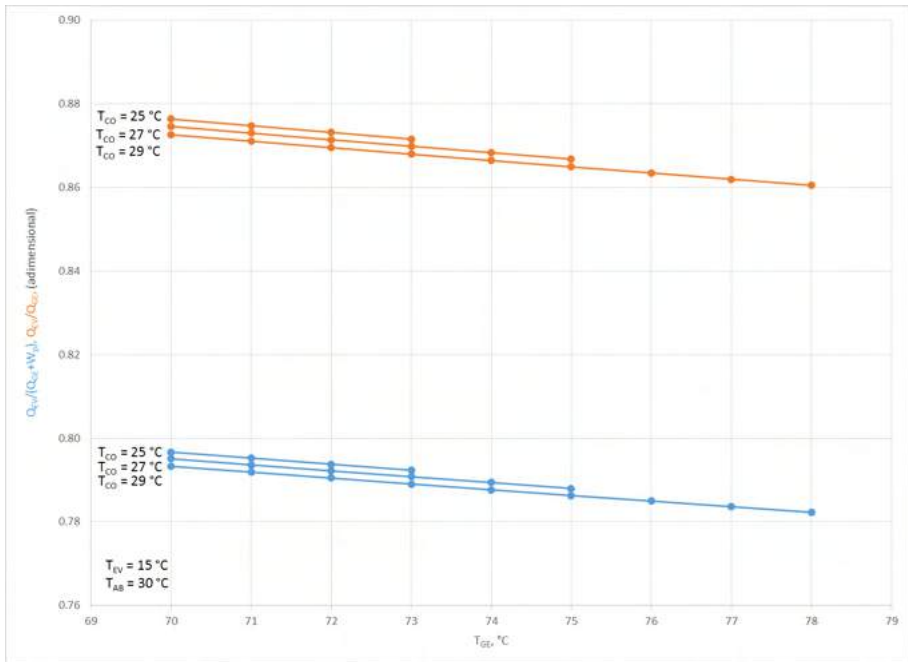


Figura 13. Efecto de la temperatura de generación de vapor por concentradores cilíndrico parabólico en el Coeficiente de operación

En la figura 14, se puede ver la orientación hacia el sur (para el hemisferio norte) a la latitud del lugar. Es notorio que esta foto se puede observar que los paneles fotovoltaicos sombrean parte de la edificación disminuyendo así la carga térmica por transmisión por muros (fenómeno de conducción térmica) sin que esto modifique significativamente la carga de aire acondicionado inicial.



Figura 14. Vista panorámica de sistema fotovoltaico y concentradores cilíndrico parabólicos.

CONCLUSIÓN

A manera de conclusión resumimos lo siguiente:

Se realizó un análisis de factibilidad acoplando las tres tecnologías, la planta de concentradores cilindro-parabólicos, una planta de paneles fotovoltaicos y el sistema de aire acondicionado por absorción, el cual permitió determinar el comportamiento exitoso en su conjunto.

Es obvio que la inclinación para los sistemas solares fijos deberá ser la de la latitud del lugar, en el hemisferio norte, los paneles fotovoltaicos estarán inclinados hacia el sur con la latitud exacta de su localidad. En el hemisferio sur, inclinados hacia el norte. No será necesario modificar en invierno ya que la mayor parte del uso ocurre en verano.

El sistema compuesto de paneles fotovoltaicos tuvo una disminución del 16 % de su capacidad de conversión de energía solar a energía eléctrica debido al incremento de temperatura y en lugar de entregar 135 W solo aporta 114 W por módulo a la temperatura ambiente. Esa cantidad es suficiente para la circulación de fluidos y para el sistema de seguimiento de los concentradores cilíndrico parabólicos.

Las Figuras mostradas reportan el comportamiento del Coeficiente de Operación, cuando la temperatura de la fuente térmica varía de 70 a 80 °C, se consideran T_{EV} de 10°C a 15 °C y T_{AB} entre 25 y 40 °C que son igual o mayor que la T_{CO} . En estas figuras se observa que los valores de COP máximos son de 0.88 (equivalente a 4 toneladas de refrigeración) y que pueden ser alcanzados con una temperatura de fuente solar de 70° C, con una planta fotovoltaica de 1.6 kW pico. Mientras que a 78 °C, se esperan valores del coeficiente de operación de 0.86.

Cuando la temperatura de alimentación es cercana a 70°C, el COP presentara valores en un rango de 0.78 a 0.88. El efecto del ambiente y las temperaturas en el condensador, el absorbedor y los paneles fotovoltaicos, impactan el desempeño del sistema en su conjunto,

en un análisis puntual en estado estable.

AGADECIMIENTOS

Los autores agradecen la participación de los integrantes del laboratorio de ingeniería térmica aplicada en las diferentes actividades para el cálculo, diseño, construcción y evaluación de este proyecto, en las instalaciones del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, así como del Taller Multidisciplinario Básico, de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, y las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

REFERENCIAS

Agencia Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Radiación incidente en la latitud N18.98 y longitud O99.23. [Estados Unidos]. Recuperado el 18 de enero de 2017 <https://eosweb.larc.nasa.gov/>.

Ali Al, Alili, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, "Review of solar thermal air conditioning technologies", *International Journal of Refrigeration*, 39;2014, 4-22.

Cengel Y., Boles M. Termodinámica. Mc Graw Hill. México.2012. pp. 591-593

Chen, G., Si, Ch., Tang, Z., Guo, K., Wang, T., Zhang, J., Wei, B. (2016). Temperature-dependent device performance of organic photovoltaic Cells base on a squaraine dye, *Synthetic metals*, 222, 293-298 pp.

CIME Power System, <http://www.cimepowersystems.com.mx/renta/calefaccion-y-aire-acondicionado/> consultado el 4 de julio de 2022

De-Francisco A., Illanes R., Torres J.L., Castillo M., De-Blas M., Prieto E., "Development and testing of a prototype of low power water-ammonia absorption equipment for solar energy applications", *Renewable Energy*, 25; 2002, 37-44.

EBRD. Renewable energy resource assessment, European bank for reconstruction and development, Romania; 2010.

Edminds J.A., Wuebles D.L., Scott M.J., "Energy and radiative precursor emissions", In: proceedings of the 8th international conference on alternative energy sources, Miami; 1987, pp: 14-60.

El-Sayed Y.M., Tribus M., Thermodynamic properties of H₂O-NH₃ mixtures: theoretical implementation for use in power cycle analysis. *ASME Pub AES*, 1 (1985) 89-95.

Fan Y., Lou L., Souyri b., Review of solar sorption refrigeration technologies: development and applications, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 11 (2007) 1758- 1775.

Hernandez- Magallanes J.A., Domínguez-Inzunza L.A., Gutiérrez-Ureta G., Soto P., Jiménez C., Rivera W., "Experimental assessment of an absorption cooling system operating with the ammonia/lithium nitrate mixture", *Energy* 78; 2014, 685-692.

Holmberg P., Berntsson T., Alternatives working fluids in heat transformers. ASHRAE Transactions, 96 (1990) 1582-1589.

Jaramillo O.A., Venegas-Reyes E., Aguilar J.O., Castrejón-García R., "Parabolic trough concentrator for low enthalpy processes", *Renew. Energ.*,60, 2013, 529-539.

Kalogirou S. A., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 1st ed. (Academic, USA, 2009).

Obi, M. y Bass, R. (2016). Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems-a review, *Renewable and sustainable Energy reviews*, 58, 1082-1094 pp.

Orozco Niveló, J.J., Buele Vallejo, L.X. y Montealegre García, J. (2015). Dimensionamiento de una instalación fotovoltaica de generación distribuida conectada a red para autoconsumo con sistema de almacenamiento de energía en una vivienda unifamiliar en la provincia del guayas y análisis de viabilidad técnica y económica, *Escuela Superior Politécnica del Litoral, [S.V.]*, 1-9 pp

Perez Blanco H., Absorption heat pump performance for different types of solution. *Int. J. Refrig.* 7 (1984) 115-122.

Xinwei S., Yingduo H., Shouzhen Z., Qingsheng L., Jing N., Comprehensive power-supply planning for active distribution system considering cooling, heating and power load balance. *J. Mod. Power. Syst. Clean.Energy.* 3 (2015) 485-493.

Secretaría de Energía (SENER). *Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029*. México,2015. pp.51

Secretaria de energía, *Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029*, SENER, México, 2015.

Solartec de México. *Características eléctricas del panel fotovoltaico S36PC [México]*. Recuperado el 4 de febrero de 2017, de <https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/Polycrystalline/12077>.

Steu S., Salavera D., Bruno J.C., Coronas A.; A basis for the development of new NH₃-H₂O-sodium hydroxide absorption chillers. *Int. J. Refrig.* 32 (2009) 577-587.

Style, O. (2012). *Energía solar autónoma: planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. Ed. ITACA, Estados Unidos, 69-70, 71-74, 81-82 pp.

Sumathy K, Huang ZC, Li ZF, "Solar absorption cooling with low grade heat source a strategy of development in south China", *Solar Energy*,72 ;2002, 155–65.

Sun J., Fu L., Zhang S.; A review of working fluids of absorption cycles, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16 (2012) 1899-1906.

Venegas-Reyes E., Jaramillo O.A., Castrejón-García R., Sosa-Montemayor F., "Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation", *J. Renew. Sustain. Energ.*, 4,2012, 053103.

UM MODELO HÍBRIDO DE BUSCA HARMÔNICA E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADO NO PROJETO DO CONTROLADOR LQR

Data de aceite: 01/08/2022

Luis B. P. Nascimento

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

Vandilberto P. Pinto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

Márcio A. B. Amora

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

Rômulo N. C. Almeida

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

ABSTRACT: This article presents the application of the Harmony Search Algorithm and a hybrid version of Harmonica Search Algorithm with Particle Swarm Optimization to the automatic weighting of matrices of Linear Quadratic Regulator. This controller has excellent properties of robust stability, however, the implementation this one has a related difficulty defining two weighting matrices Q and R . A Harmony Search Algorithm was implemented and applied in the

search of the weighting matrices. In order to obtain a better performance, a implementation of Particle Swarm Optimization was used to provide a self-adaptation in one of the Harmonic Search parameters. When applying the search, both the standard version and the hybrid version showed good results, however, the hybrid version produced better results in two aspects: convergence time and minimizing the evaluation function value.

KEYWORDS: Harmony Search Algorithm, Particle Swarm Optimization, Optmal Control, Linear Quadratic Regulator, Intelligent Control.

RESUMO: O presente artigo apresenta a aplicação do Algoritmo de Busca Harmônica e de uma versão híbrida de Busca Harmônica e Otimização por Enxame de Partículas na determinação otimizada das matrizes de ponderação do Regulador Linear Quadrático. Esse controlador possui excelentes propriedades de estabilidade robusta, entretanto, seu projeto possui uma dificuldade relacionada à definição de duas matrizes, Q e R . Um algoritmo de Busca Harmônica padrão foi implementado e aplicado na busca das matrizes. A fim de obter uma melhor performance, foi utilizada a técnica Otimização por Enxame de Partículas para prover uma auto-adaptação em um dos parâmetros da Busca Harmônica. Ao aplicar no problema, tanto a versão padrão quanto a versão híbrida apresentaram bons resultados, contudo, a versão híbrida obteve melhores resultados em três aspectos: Tempo de convergência, minimização do valor da função de avaliação e número de iterações.

PALAVRAS-CHAVE: Busca Harmônica, Otimização por Enxame de Partículas, Controle Ótimo, Regulador Linear Quadrático, Controle Inteligente.

1 | INTRODUÇÃO

O Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator* - LQR) é uma importante técnica de controle ótimo que possui um papel primordial na teoria do controle moderno. O controlador LQR possui excelentes propriedades de estabilidade robusta, apresenta margens de ganho infinito e margens de fase com 60° , e minimiza um determinado índice de desempenho, o que garante um sistema otimizado com o menor gasto possível de energia (Maciejowski, 1989).

São constantes as pesquisas envolvendo o LQR, principalmente aplicado a complexos sistemas de controle (Bayani e Hajipour, 2013; Inumoh et al., 2014; Wei e Yao, 2015; Mazumdar et al., 2015; Rui et al., 2015; Brasel, 2015; Cheema et al., 2016; Singh e Pal, 2016).

Mesmo com inúmeras vantagens, o desempenho do LQR depende fortemente de dois componentes essenciais, suas matrizes de ponderação Q e R . Elas permitem que o controlador atenda as especificações do projeto, entretanto, tratam-se de valores com um grande espaço de busca, e definir essas matrizes pode se tornar um desafio tedioso e complexo, comprometendo os prazos definidos no projeto por conta da paralisa gerada (Gbaupe, 1972; Stein, 1979; Medanic, Tharp e Perkins, 1988). Visando minimizar os percalços causados por essa problemática, vem se consolidando o uso de diversos algoritmos de Inteligência Computacional (IC) para otimizar essa busca, tais como Algoritmo Genético (Gupta e Tripathi, 2014), Recozimento Simulado (Jaleel e Francis, 2013), entre outros.

A técnica Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) tem sido aplicada em diversos trabalhos, entretanto, sua forma padrão apresenta problemas de convergência prematura (Nezami, Bahrampour e Jamshidlou, 2013), o que não é favorável a um problema com variáveis de decisão fortemente acopladas.

Um método de busca que vem ganhando destaque nos últimos anos devido a sua facilidade de implementação e capacidade de identificar regiões de alto desempenho dentro do espaço de busca em um tempo razoável é o Algoritmo de Busca Harmônica (*Harmony Search* - HS), uma nova meta-heurística baseada em conceitos musicais de improvisação (Geem, Kim e Loganathan, 2001), que tem sido aplicada nos mais diversos problemas (Manjarres *et al.*, 2013), inclusive na determinação das matrizes Q e R , proposta apresentada por (Nascimento *et al.*, 2015a; 2015b).

O presente trabalho apresenta a aplicação do algoritmo de Busca Harmônica na determinação das melhores matrizes Q e R do controlador LQR. A fim de impulsionar o poder de otimização do HS, o PSO foi aplicado na adaptação automática de um de seus

parâmetros.

As próximas seções deste artigo estarão organizadas da seguinte maneira: na seção 2 serão abordados os conceitos que envolvem o algoritmo HS. A seção 3 abordará uma introdução ao PSO. Na seção 4 será apresentado o Regulador Linear Quadrático e na seção 5 será apresentado o como foi projetado o algoritmo HS+PSO aplicados ao LQR. A seção 6 mostrará os resultados das simulações, assim como a planta utilizada como teste e por fim, na seção 7, serão expostas as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

2 | ALGORITMO DE BUSCA HARMÔNICA

A Busca Harmônica (Geem, Kim e Loganathan, 2001), é uma meta-heurística de otimização baseada em população que foi inspirada no processo de improvisação musical onde os músicos tentam buscar as notas que melhor compõem uma harmonia perfeita.

Uma comparação entre o processo de improvisação musical e um problema de otimização é feito em (Geem, 2010), onde um trio de Jazz procura realizar uma composição através de um improviso. O saxofonista, o baixista e o guitarrista compõem as variáveis de decisão do problema; as notas tocadas nos instrumentos representam os intervalos de valores de cada variável; as combinações das notas representam as possíveis soluções e o ato de apreciação dos ouvintes representa a função de avaliação ou função objetivo do problema, como é mostrado na Figura 1.



Figura 1 – Comparação entre o processo de improvisação musical e otimização

O HS padrão pode ser descrito em cinco passos:

1. Inicialização dos parâmetros.
2. Inicialização da Memória Harmônica
3. Improviso de uma nova harmonia;
4. Atualização da Memória Harmônica;
5. Verificação do critério de parada.

Os parâmetros são o tamanho da memória harmônica (*Harmony Memory Size* - HMS), taxa de consideração da memória harmônica (*Harmony Memory Consideration Rate* - HMCR), taxa de ajuste dos valores (*Pitch Adjustment Rate* - PAR), largura de banda (*BeWidth* - BW) e número de máximo de improvisações (*Number of improvisations* - NI).

O HS possui o mesmo conceito dos algoritmos evolucionários sobre geração randômica de população. A Memória Harmônica (HM) possui um conjunto de HMS harmonias,

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde, x é uma variável de decisão do vetor de harmonia, n é o número de variáveis utilizadas para encontrar o valor da função de avaliação f do problema.

A cada iteração do algoritmo é gerada um novo vetor de harmonia, $x'=(x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, que corresponde a uma solução candidata. Cada elemento x é obtido a partir de harmonias contidas na HM, selecionadas por uma probabilidade de HMCR:

$$x'_i = \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, \dots, x_i^{HMS}\} & P = \text{HMCR} \\ x'_i \in X_i & P = (1 - \text{HMCR}) \end{cases} \quad (2)$$

tal que X_i é um conjunto com a faixa de valores possíveis para cada variável de decisão e “ $P = \text{HMCR}$ ”, lê-se probabilidade de HMCR.

Cada componente obtido é testado para determinar se deve ser ajustado. Esse ajuste é dado com base em BW e com probabilidade de PAR:

$$x'_i = x'_i \pm r \times BW, \quad r \in (0,1) \quad (3)$$

Se o vetor gerado for melhor que a pior harmonia da HM, a pior é substituída. O algoritmo encerra de acordo com um critério, que pode ser o número de iterações ou se a harmonia gerada atende aos critérios do problema.

3 | OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

O PSO (Kennedy e Eberhart, 1995) é uma técnica de otimização estocástica baseada em população e inspirada no comportamento de animais como voo de pássaros,

abelhas, nado de cardume de peixes, entre outros.

Nesse método é criado um conjunto de partículas que correspondem às possíveis soluções. Cada partícula possui seu vetor de velocidade, ambos inicializados aleatoriamente. Após inicializadas, as partículas são avaliadas.

O algoritmo considera a melhor posição de cada partícula e uma melhor posição global. A cada iteração do algoritmo, é calculada a velocidade das partículas (4) e suas novas posições (5).

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1(p_i - x_i(t))r_1 + c_2(g - x_i(t))r_2 \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (5)$$

Nas equações da velocidade (4) e do movimento (5), t e $t+1$ representam duas sucessivas iterações, v_i é o vetor de velocidade da partícula x_i . p_i é chamado de *personal best* de uma partícula, que corresponde à melhor posição de uma determinada partícula, enquanto g , *global best*, é a melhor posição que já foi ocupada por alguma partícula. As constantes c_1 e c_2 são valores reais, usualmente $0 \leq c_1, c_2 \leq 4$ e r_1 e $r_2 \in (0,1)$.

4 | REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO

O LQR é um controlador ótimo com excelentes características de desempenho e de implementação, que garante a estabilidade frente a pequenas perturbações. Considere a equação linear invariante no tempo:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Esse controlador objetiva encontrar o vetor de controle ótimo que minimize a função de custo (7), representado pelo índice de desempenho quadrático J , que harmoniza a eficácia da regulação com o uso do vetor de controle.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Q(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt \quad (7)$$

Em (6) tem-se A , B , C e D , matrizes relacionadas ao modelo do sistema para a variável de estado $x(t)$, e a variável de controle $u(t)$, respectivamente. Em (7), Q , uma matriz semidefinida positiva ($Q \geq 0$) e R , uma matriz positiva definida ($R > 0$). O LQR permite determinar uma matriz K de ganho ótimo através da lei de controle:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (8)$$

sendo

$$K = R^{-1}B^T P \quad (9)$$

A matriz P é determinada a partir da resolução da Equação Algébrica de Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (10)$$

A partir dos ganhos obtidos com a matriz aumentada (Ogata, 2011), pode-se obter o ganho integral (K_i), definido por $K = [K_r, K_i]$. Os ganhos K_r e K_i podem ser aplicados ao sistema linear de controle, por meio do modelo matricial dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_r & BK_i \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(t) \quad (11)$$

5 | MODELAGEM DO LQR OTIMIZADO

5.1 Busca Harmônica

5.1.1 Codificação da Harmonia

A fim de simplificar a implementação do algoritmo, utilizou-se a abordagem empregada por (Bryson e Ho, 1975), onde considerou-se os valores diagonais das matrizes Q e R , ou seja, $Q = \text{diag}([Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_A}])$ e $R = \text{diag}([R_1, \dots, R_{n_B}])$, sendo n_A a ordem do sistema e n_B o número de entradas.

Dessa forma, o vetor de harmonia é dado por:

$$QR_i = [Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_A}, R_1, \dots, R_{n_B}] \quad (12)$$

5.1.2 Função de Avaliação

Para esse problema, o HS deve minimizar o erro correspondente ao somatório do módulo dos resíduos gerados entre os valores dos parâmetros definidos nos critérios de projeto, dessa forma, cada harmonia receberá um valor de erro correspondente, definido por:

$$f(QR_i) = |Tr - Tr_i| + |Ts - Ts_i| + |Mp - Mp_i| + |Es - Es_i| \quad (13)$$

Os parâmetros da função (13) representam o tempo de subida (*Rise Time* – Tr), tempo de regime estacionário (*Settling Time* – Ts), sobressinal (*Maximum Peak* – Mp) e erro em regime estacionário (Es).

5.1.3 Tratamento do Parâmetro PAR

Para o propósito do LQR, considerou-se um vetor PAR, contendo os parâmetros para cada variável de decisão.

$$PAR_i = [PAR_1, PAR_2, \dots, PAR_{QR_n}] \quad (14)$$

5.2 Otimização por Enxame de Partículas

Foi implementado um algoritmo PSO para determinar os melhores parâmetros de ajuste para o Algoritmo HS. As partículas do PSO são definidas na Equação (14), e a função de avaliação das partículas é a mesma do HS, Equação (13).

6 I RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A fim de testar a eficácia dos algoritmos, foi considerado o modelo linear do helicóptero Chinook CH-47 (Doyle e Stein, 1981), buscando controlar duas medias: velocidade vertical (V_z) e ângulo de arfagem (θ).

$$A = \begin{bmatrix} -0,02 & 0,005 & 2,4 & -32 \\ -0,14 & 0,44 & -1,3 & -30 \\ 0 & 0,018 & -1,6 & 1,2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x \quad B = \begin{bmatrix} 0,14 & -0,12 \\ 0,36 & -8,6 \\ 0,35 & 0,009 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0,3048 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 57,3 \end{bmatrix} x$$

Os polos do sistema em malha aberta são $\{-2,2279 \ 0,0652 \ 0,4913 \pm 0,4151j\}$. De acordo com os critérios adotados em (Hartmann, Stein e Pratt, 1979), os valores tomados como base para os parâmetros de resposta transitória estão descritos na Tabela 1.

Saída	Tr	Ts	Mp
θ	1,5	4,0	1,05
V_z	2,0	4,0	0

Tabela 1. Especificações do projeto CH-47.

Foi aplicado no problema um algoritmo de Busca Harmônica padrão e a Busca Harmônica híbrida com Otimização por Enxame de Partículas (HSPSO) para fins de comparação. Os parâmetros utilizados nos algoritmos são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

HMCR	BW	HMS	NI	PAR
0,9	30	50	1000	0,8

Tabela 2. Parâmetros do HS.

Nº Partículas	C1	C2
20	2	2

Tabela 3. Parâmetros do PSO.

O critério de parada utilizado no algoritmo foi o número de iterações = 1000, assim

foi possível avaliar o algoritmo pela velocidade da convergência.

6.1 Resultados com Busca Harmônica

O HS obteve bons resultados, e com uma performance razoavelmente eficaz, foi capaz de otimizar a busca das matrizes Q e R , obtendo $Q=\text{diag}([0,0045 \ 0,5066 \ 1,6449 \ 0,6632 \ 4,2762 \ 1,2132])$ e $R=\text{diag}([7,2699 \ 0,0512])$.

A Figura 2 apresenta uma simulação com a aplicação do HS e a Figura 3 apresenta o gráfico de convergência dessa simulação.

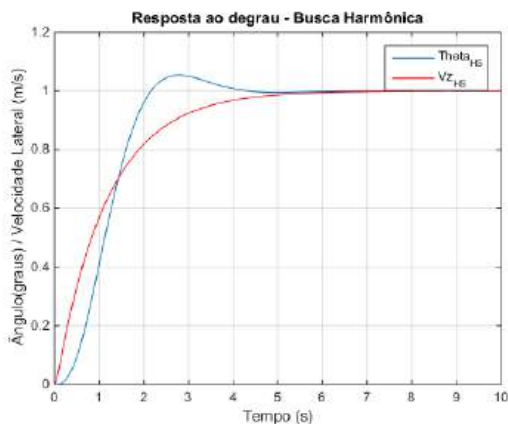


Figura 2 – Resposta do sistema ao degrau unitário.

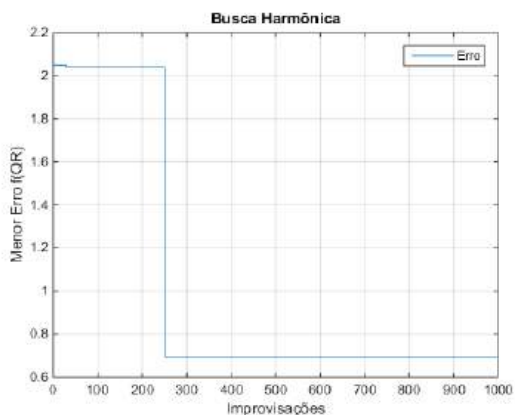


Figura 3 – Gráfico da convergência do algoritmo. Decaimento da função de avaliação do HS.

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos na simulação com o algoritmo HS.

Menor Erro f(QR)	Tempo (s)	Nº de Iterações
0,6934	34,3587	1000

Tabela 4. Análise da Convergência com HS.

Pode ser observado na Figura 2 que, na simulação obtida com o algoritmo HS, o sistema foi controlado, com poucos segundos para estabilização em ambas as saídas. O resultado do controle foi satisfatório, tendo em vista que o esperado para esse sistema é um comportamento próximo ao apresentado.

A Figura 3 e a Tabela 4 apresentam informações relacionadas à convergência do algoritmo HS na busca das matrizes Q e R . O algoritmo, embora atendendo as necessidades do problema, não apresentou uma convergência com um custo baixo.

6.2 Resultados com Busca Harmônica e PSO

O HPSO obteve ótimos resultados, e com uma performance eficaz, sendo capaz de otimizar a busca das matrizes Q e R , obtendo $Q = \text{diag}([0,0003 \ 0,0948 \ 8,5310 \ 2,0605 \ 1,4284 \ 0,8196])$ e $R = \text{diag}([0,7130 \ 1,6954])$. A Figura 4 mostra uma simulação com a aplicação do HPSO e a Figura 5 apresenta o gráfico de convergência dessa simulação.

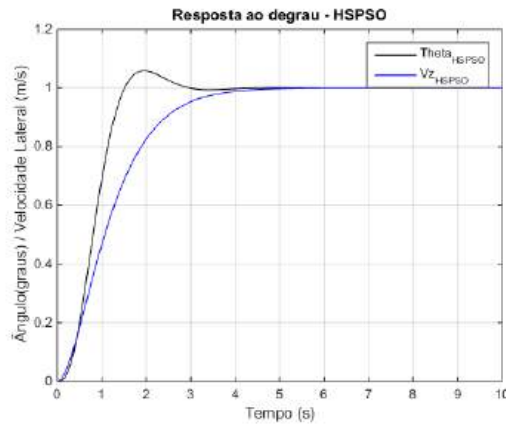


Figura 4 – Resposta do sistema ao degrau unitário.

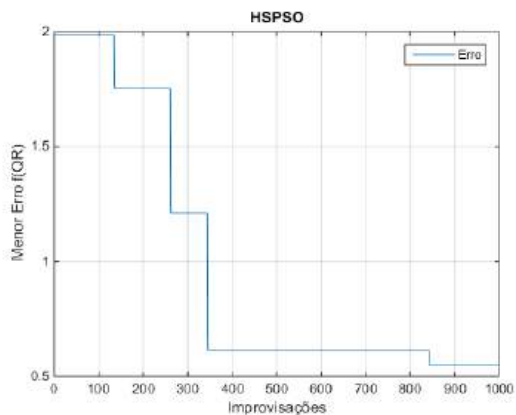


Figura 5 – Gráfico da convergência do algoritmo. Decaimento da função de avaliação do HPSPO.

Na Tabela 5 são mostrados os valores referentes ao gráfico de convergência da simulação com HPSPO.

Menor Erro f(QR)	Tempo (s)	Nº de Iterações
0,5474	26,2188	1000

Tabela 5. Análise da Convergência com HPSPO

Pode ser observado na Figura 4 que, na simulação obtida com o algoritmo HPSPO, o resultado do controle foi satisfatório, tendo em vista que o esperado para esse sistema era um comportamento próximo ao apresentado. O algoritmo, além de ter atendido aos critérios do projeto de controle, obteve convergência em cerca de 30 segundos e com um erro aceitável para esse problema. A Tabela 6 mostra as variáveis relacionadas à resposta transitória das simulações. Esses parâmetros estão presentes na equação (13).

	Saída	Tr	Ts	Mp
HS	Θ	1,3061	3,6913	1,0537
	Vz	2,5284	4,5280	0,9998
HPSPO	Θ	0,9163	2,5841	1,0583
	Vz	2,0952	3,6075	1.0000

Tabela 6. Análise da Saída em Regime Transitório

As Figuras 6 e 7 apresentam uma comparação entre as respostas em regime transitório. As imagens foram plotadas, separadas por saídas.

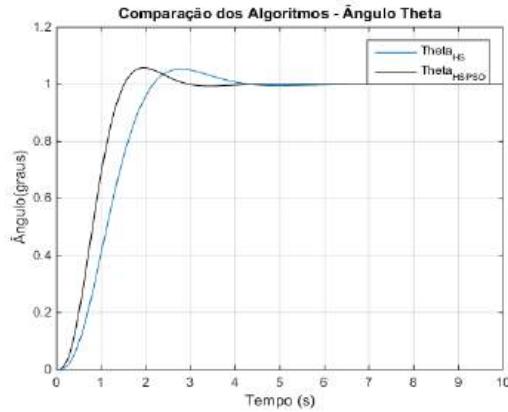


Figura 6 – Resposta dos sistemas ao degrau do Ângulo Theta.

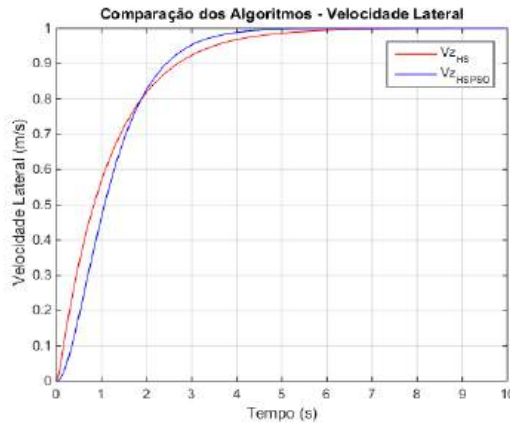


Figura 7 – Resposta dos sistemas ao degrau para a Velocidade Vertical.

Através dos dados apresentados na Tabela 6, é possível afirmar que a simulação realizada com o HSPSO apresentou melhor desempenho em comparação com a simulação através de HS. Embora possuam valores aproximados, a simulação com a técnica híbrida claramente se mostrou superior, uma vez que os resultados do HSPSO se aproximam mais dos valores apresentados na Tabela 1.

Devido a natureza estocástica do algoritmo de HS, principalmente pela Memória Harmônica gerada de maneira aleatória, cada execução apresenta resultados distintos. Dessa forma, os algoritmos foram submetidos a uma série de 30 execuções. Os valores médios estão presentes na Tabela 7.

Algoritmo	Erro Médio f(QR)	Desvio Padrão f(QR)	Tempo Médio (s)
HS	0,6068	0,0557	34,6843
HSPSO	0,4030	0,0192	23,0780

Tabela 7. Análise da Convergência com HSPSO

Pode-se observar na sumarização de resultados apresentados na Tabela 7, que os algoritmos obtiveram valores aproximados. Embora aceitável, o HS apresentou pior um resultado, provavelmente por conta da definição empírica dos parâmetros. Já com a versão híbrida apresentada neste trabalho, houve uma melhora considerável nos resultados, em comparação com o HS.

Devido ao número de iterações do algoritmo, o tempo médio excedeu 20 segundos, entretanto, é importante considerar que a cada passo do algoritmo o sistema é simulado HMS vezes, para a obtenção dos parâmetros de resposta transitória e do erro em regime permanente.

7 | CONCLUSÃO

A presente pesquisa apresentou uma implementação do Algoritmo de Busca Harmônica com o parâmetro PAR definido de maneira adaptativa por meio de Otimização por Enxame de Partículas, aplicado na determinação das matrizes de ponderação do Regulador Linear Quadrático.

Pôde-se confirmar que a busca das matrizes Q e R pode ser tratado como um problema de otimização, por conta da minimização do erro gerado entre os índices de desempenho do sistema. Foi testada a versão padrão do HS e o HSPSO, versão híbrida proposta. Constatou-se que, embora ambos algoritmos apresentaram bons resultados, o HSPSO se mostrou melhor em tempo de execução e convergência.

Com base no exposto, é possível afirmar que a hibridização dos algoritmos HS e PSO se tornou uma alternativa à busca automática das matrizes Q e R do LQR, e para problemas em geral, com a minimização dos esforços na definição de parâmetros por meios empíricos.

Pretende-se como trabalho futuro implementar a abordagem robusta do controlador LQR, utilizando o Algoritmo de Busca Harmônica como meio de otimização dos processos empíricos de determinação de matrizes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo fomento à pesquisa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- Bayani, H. and Hajipour, J. (2013). On the design of an autopilot for roll motion in an airplane using LQR and flexible dynamic model. The 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation.
- Brasel, M. (2015). A gain-scheduled multivariable LQR controller for hybrid excitation synchronous machine. 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics.
- Bryson, A. and Ho, Y. (1975). *Applied optimal control*. Washington: Hemisphere Pub. Corp.
- Cheema, M., Fletcher, J., Xiao, D. e Rahman, M. (2016). A Linear Quadratic Regulator-Based Optimal Direct Thrust Force Control of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motor. IEEE
- Doyle, J. e Stein, G. (1981). Multivariable feedback design: Concepts for a classical/modern synthesis. IEEE Transactions on Automatic Control, 26(1), pp.4-16.
- Gbaupe, D. (1972). Derivation of weighting matrices towards satisfying eigenvalue requirements. International Journal of Control, 16(5), pp.881-888.
- Geem, Z. (2010). Recent advances in harmony search algorithm. Berlin: Springer-Verlag.
- Geem, Z., Kim, J. e Loganathan, G. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. SIMULATION, 76(2), pp.60-68.
- Gupta, S. e Tripathi, R. (2014). Improved performance of LQR controller in CSC based STATCOM using genetic optimization. 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON).
- Hartmann, G., Stein, G. e Pratt, S. (1979). Digital adaptive controllers for VTOL vehicles. NASA Contractor Report., 1.
- Inumoh, L., Horri, N., Forshaw, J. e Pechev, A. (2014). Bounded gain-scheduled LQR satellite control using a tilted wheel. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 50(3), pp.1726-1738.
- Jaleel, J. e Francis, R. (2013). Simulated annealing based control of an Inverted Pendulum System. 2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC).
- Kennedy, J. e Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.
- Maciejowski, J. (1989). Multivariable feedback design. Wokingham, Engle: Addison-Wesley.
- Manjarres, D., et.al. (2013). A survey on applications of the harmony search algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 26(8), pp.1818-1831.
- Mazumdar, D., Sinha, D., Panja, S. e Dhak, D. (2015). Design of LQR controller for solar tracking system. 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer e Communication Technologies (ICECCT).
- Medanic, J., Sharp, H. e Perkins, W. (1988). Pole placement by performance criterion modification. IEEE Transactions on Automatic Control, 33(5), pp.469-472.

Nascimento, L., Pinto, V., Amora, M. e Souza, D. (2015a). Aplicação do Algoritmo de Busca Harmônica No Projeto de um Regulador Linear Quadrático Com Ação Integral. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI).

Nascimento, L., Pinto, V., Amora, M. e Souza, D. (2015b). Busca Harmônica com ajuste adaptativo de parâmetro por meio de Algoritmo Genético aplicada na otimização do projeto LQR. XII Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional – CBIC.

Nezami, O., Bahrampour, A. e Jamshidlou, P. (2013). Dynamic Diversity Enhancement in Particle Swarm Optimization (DDEPSO) Algorithm for Preventing from Premature Convergence. *Procedia Computer Science*, 24, pp.54-65.

Ogata, K. (2011). Engenharia de controle moderno. São Paulo (SP): Pearson Prentice Hall.

Rui, W., Yi-Ming, S., Mei-Tong, L. e Hao, Z. (2015). Research on Bus Roll Stability Control Based on LQR. 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City.

Singh, A. e Pal, B. (2016). Decentralized Control of Oscillatory Dynamics in Power Systems Using an Extended LQR. *IEEE Trans. Power Syst.*, 31(3), pp.1715-1728.

Stein, G. (1979). Generalized quadratic weights for asymptotic regulator properties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(4), pp.559-566.

Wei, L. e Yao, W. (2015). Design and implement of LQR controller for a self-balancing unicycle robot. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation.

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS FABRICANTE EPSON

Data de aceite: 01/08/2022

Bruno Suracci de Lima

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão
Campo Mourão - Paraná - Brasil

Flávio Luiz Rossini

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão
Campo Mourão - Paraná - Brasil

João Henrique Dias Corrêa

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão
Campo Mourão - Paraná - Brasil

João Marcos Pericaro Lopes

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão
Campo Mourão - Paraná - Brasil

Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão
Campo Mourão - Paraná - Brasil

Yuri Ruzzene Barroso

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão
Campo Mourão - Paraná - Brasil

RESUMO: O artigo propôs a modelagem matemática, simulação e análise do robô manipulador SCARA T3 401SS da fabricante Epson. O assunto se justifica na demanda por crescimento e desenvolvimento da robótica na indústria, a qual esta diretamente relacionada com a competitividade do setor e do país. A Confederação Nacional Da Industria (CNI) desenvolveu uma pesquisa sobre os resultados das empresas que adotaram conceitos da indústria 4.0, sendo os resultados divulgados no ano de 2018. No Brasil existem 1.595 unidades com instalações de robôs. Assim, desenvolveu-se os modelos estático e dinâmica do referido robô e a utilização de um sistema de controle não linear denominado de controle particionado baseado em modelo no espaço de juntas. A partir dessa proposta, construiu-se o código no ambiente do software MATLAB®. Em seguida, realizou-se a simulação e foram obtidos os resultados numérico, quanto a posição, velocidade e aceleração do efetuador em relação a base fixa do robô. Por meio da descrição matemática e da simulação computacional, os resultados se mostraram coerentes e promissores, os quais têm a finalidade de contribuir com estudantes e profissionais da área que buscam modelos e comportamentos temporais, a fim de checagem, comparação e implementar em novas tecnologias embarcadas.

PALAVRAS-CHAVE: Robô Scara T3 401SS, modelagem dinâmica, modelagem cinemática, sistema de controle não linear.

ABSTRACT: The article proposed the mathematical modeling, simulation and analysis

of the robot manipulator SCARA T3 401SS from Epson. The subject is justified in the demand for knowledge and development of robotics in the industry, which is directly related to the competitiveness of the sector and the country. The National Confederation of Industry (NCI) developed a survey on the results of companies that adopted industry 4.0 concepts, and the results were released in 2018. In Brazil there are 1,595 units with robot installations. Thus, the static and dynamic models of the robot were developed and the use of a non-linear control system called partitioned control based on a joint space model. Based on this proposal, the code was built in the MATLAB® software environment. Then, the simulation was carried out and the numerical results were obtained, regarding the position, speed and acceleration of the effector in relation to the fixed base of the robot. Through mathematical description and computer simulation, the results proved to be coherent and promising, which are intended to contribute to students and professionals in the area who seek temporal models and behaviors, in order to check, compare and implement new embedded technologies.

KEYWORDS: Scara T3 401SS robot, dynamic modeling, kinematic modeling, non-linear control system.

1 | INTRODUÇÃO

Desde 2010, a demanda por robôs industriais aumentou consideravelmente, devido à tendência de automação e inovação tecnológica industrial e uso da robótica. Após a queda nas instalações de robôs em 2019, por conta da guerra comercial entre China e Estados Unidos da América, o número de instalações de robôs tornou a crescer em 2020, apesar da situação de pandemia global, e atingiu o número de 383.545 unidades instaladas. No Brasil, entretanto, esse número caiu de 1.833 para 1.595 unidades instaladas [1].

Apesar do Brasil não estar entre os maiores consumidores de robôs do mundo, assim como de plantas industriais instaladas, a robótica ainda é uma área que demanda de conhecimento e desenvolvimento, pois o uso da robótica está diretamente relacionada à competitividade da indústria [1]. De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional da Indústria (CNI), as empresas que adotaram os conceitos da indústria 4.0 obtiveram melhores resultados do que possuíam anteriormente [2].

Em certas situações, a intervenção humana se torna limitada ou impossível, tais com condições ambientais, incapacidade física, alta precisão de execução, fator de escala de força ou de movimento, etc. Dessa forma, torna-se atrativo o uso de sistemas robóticos, o qual surge como uma possível solução no meio industrial. Ao considerar o fator de escala, destaca-se o uso da força em aplicações industriais, como no caso da manipulação de equipamentos de dobra de chapas metálicas, usados na indústria automobilística. Existem outras aplicações de extrema precisão, onde o robô se movimenta a partir do rastreamento de trajetória, sendo essas preestabelecida para execução da respectiva tarefa. Desse modo, o uso de manipuladores robóticos se torna atrativo e motiva tanto o desenvolvimento de máquinas como o aperfeiçoamento de sistemas que visam auxiliar o homem em suas atividades de projeto e desenvolvimento [3].

Nesse contexto, o presente artigo desenvolveu um estudo de caso aplicado ao Robô Manipulador Scara T3 401SS da fabricante EPSON [4]. A partir das notas de aula da disciplina de Introdução à Robótica¹ do curso de Engenharia Eletrônica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Campo Mourão [5], realizaram-se as modelagens da cinemática direta e da dinâmica do robô, além da aplicação de uma estratégia de controle não linear de posição.

O artigo se encontra organizado do seguinte modo: na Seção II, relatou-se sobre a descrição do modelo matemático; na Seção III, desenvolveu-se a cinemática direta do manipulador; na Seção IV, realizou-se o planejamento de trajetória; na Seção V, desenvolveram-se as equações dinâmicas; na Seção VI, implementou-se o controle não linear de torque do robô; na Seção VII, apresentou-se os resultados gráficos da trajetória, da dinâmica e do sistema controle baseado em modelo; e na Seção VIII, descreveu-se os resultados do trabalho.

2 | DESCRIÇÃO DO MODELO

Considerou-se o robô SCARA modelo T3 401SS da fabricante Epson para a modelagem matemática, a qual incluem o modelo estático, representado pela cinemática direta, e a descrição dinâmica, além da estratégia de controle. Toda modelagem matemática e o controle foram baseados na literatura do CRAIG [6]. O referido robô possui três graus de liberdade, na qual duas juntas são rotativas e a última é prismática, abreviado por RRP ou 2RP, ilustrado na Figura 1.



Fig. 1. Robo Epson modelo T3 401SS [7]

¹ Aulas ministradas pelo Prof. Dr. Flávio Luiz Rossini na disciplina de Introdução a Robótica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus de Campo Mourão - UTFPR-CM, durante o primeiro semestre de 2022

Para melhor inferir sobre o modelo matemático, desenvolveu-se um esquema mecânico em duas dimensões do robô, estabeleceu-se a hipótese de simetria em relação ao eixo X , conforme ilustrado na Figura 2. Na referida figura, observam-se os elos e juntas com os respectivos Sistemas de Referência (SR) $\{i\}$, com $i = 1, 2, 3, 4$, localizados na origem de cada elo ou corpo rígido do robô.

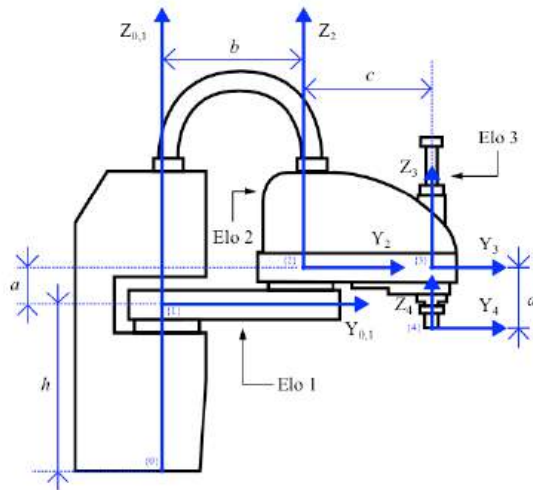


Fig. 2. Modelo mecânico 2D

A. Posição do SR $\{i\}$

Nesta subsecção, são apresentadas as posições dos SR $\{i\}$ em relação ao SR $\{i - 1\}$, com $i = 1, 2, 3, 4$. A partir do estabelecimento do SR 0 como origem e fixo, os demais SR são móveis e foram obtidos conforme descrito:

$${}^0P_1 = [0 \quad 0 \quad h]^T \quad (1)$$

$${}^1P_2 = [0 \quad b \quad a]^T \quad (2)$$

$${}^2P_3 = [0 \quad c \quad 0]^T \quad (3)$$

$${}^3P_4 = [0 \quad 0 \quad -d]^T \quad (4)$$

sendo d o movimento prismático do SR $\{3\}$.

B. Orientação do SR $\{i\}$

Para descrição completa de um SR, além da posição há necessidade da orientação do mecanismo. Assim, realizaram-se as projeções dos SR $\{i\}$ em relação ao SR $\{i - 1\}$, com $i = 1, 2, 3, 4$, expresso como:

$${}^i{}_{i-1}R = \begin{bmatrix} X_i X_{i-1} & Y_i X_{i-1} & Z_i X_{i-1} \\ X_i Y_{i-1} & Y_i Y_{i-1} & Z_i Y_{i-1} \\ X_i Z_{i-1} & Y_i Z_{i-1} & Z_i Z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A projeção do SR 1 em relação ao SR 0 em torno do eixo Z, expressada por:

$${}^0{}_{1}R = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

sendo $\cos(\theta_1) = c_1$ e $\sin(\theta_1) = s_1$.

Analogamente para o SR 2 em relação ao SR 1 em torno do eixo Z, obtida por:

$${}^1{}_{2}R = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo $\cos(\theta_2) = c_2$ e $\sin(\theta_2) = s_2$.

No SR {3} em relação ao SR {2} ocorre o movimento prismático ao longo do eixo Z, portanto a matriz rotacional é igual a identidade de ordem 3, dada por:

$${}^2{}_{3}R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Por fim, o SR {4} em relação ao SR {3} em torno do eixo Z, a matriz rotacional é obtida como:

$${}^3{}_{4}R = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo $\cos(\theta_4) = c_4$ e $\sin(\theta_4) = s_4$.

C. Equação Transformação

Para descrição completa da Cinemática Direta do robô, o vetor de posição, Eqs. (1)-(4), e a matriz rotacional, Eqs. (6)-(9), dos respectivos SR devem ser concatenados numa estrutura única, denominada de Equação Transformação (ET). A forma geral da ET é dada por:

$${}^i{}_{i-1}T = \begin{bmatrix} {}^i{}_{i-1}R & {}^i{}_{i-1}P_i \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

A seguir são listadas as ETs para cada elo, Eq. (10), com $i = 1, 2, 3, 4$, da forma:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 I CINEMÁTICA

Cinemática é a área do conhecimento que trata do assunto sem considerar as forças que o causam, essa trata apenas da posição, velocidade, aceleração ao longo do tempo e demais derivadas, a partir da geometria. Nesta etapa serão consideradas as posições e orientações dos SR do robô em uma configuração estática, afim de determinar a posição dos elos em relação ao SR{0}.

A. Cinemática Direta

A Cinemática Direta (CD), corresponde a descrição matemática estática do robô, essa descrição possui como variáveis independentes $\theta = [\theta_1, \theta_2, d]^T$ e como variáveis dependentes a posição cartesiana do SR {4}, ${}^0P_4 = \{x \ y \ z\}^T$.

Afim de localizar o efetuador final, SR {4}, em relação a base fixa do robô, SR {0}, realizou-se a multiplicação das ETs, Eqs. (11)-(14), da forma:

$${}^0_4T = {}^0_1T ({}^1_2T ({}^2_3T ({}^3_4T))) \quad (15)$$

A ET, mostrada na Eq. (15), possui estrutura da forma:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} {}^0_4R & {}^0P_4 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

sendo, por inspeção, possível identificar a matriz rotacional equivalente, 0_4R , assim como a localização do efetuador do robô, 0P_4 .

4 I DESCRIÇÃO DA TRAJETÓRIA

Nesta seção, descreveu-se a trajetória do referido robô, a partir do uso da Eq. (16).

A trajetória do robô deve possuir movimento suave, isso é necessário para que o manipulador não tenha movimentos bruscos, os quais podem acarretar em vibrações ou danos no sistema. Para tender a restrição de movimento suave, usou-se o polinômio do terceiro grau, da forma:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (17)$$

sendo $\theta(t)$ o valor do ângulo da junta em função do tempo t , a_i , com $i = 0, 1, 2, 3$, são os parâmetros do polinômio para que o movimento seja suave.

A primeira deriva da Eq. (17), a qual corresponde a equação de velocidade do mecanismo, obtida por:

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (18)$$

A derivada da Eq. (18), sendo essa a equação de aceleração, expressada por:

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t \quad (19)$$

Estabelecidas das Eqs. (17)-(19), em seguida foram impostas as restrições de posição e velocidade, como:

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (20)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (21)$$

$$\dot{\theta}(0) = 0 \quad (22)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (23)$$

sendo t_f tempo final do movimento, θ_0 ângulo inicial e θ_f ângulo final, além das velocidades inicial e final nulas.

Para determinar os parâmetros a_i , com $i = 0, 1, 2, 3$, foram substituídas as condições Eqs. (20)-(23), nas Eqs. (17)-(19), ao manipular obteve-se:

$$a_0 = \theta_0 \quad (24)$$

$$a_1 = 0 \quad (25)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \quad (26)$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \quad (27)$$

A partir dos parâmetros determinados, Eqs. (24)-(27), torna-se possível realizar o planejamento de trajetória do efetuador do robô, conforme será ilustrado na Seção de Resultados.

5 | DINÂMICA

A dinâmica é a área do conhecimento que considera as forças necessárias para causar o movimento. Neste contexto existem dois problemas relacionados a dinâmica do robô, a saber: (i) a partir de um ponto de trajetória encontrar o vetor τ necessário para os torques das juntas; e (ii) com o vetor de torque τ encontrar a trajetória do robô.

A. Distribuição de Massa

Para iniciar o estudo do movimento, torna-se necessário analisar a distribuição de massas dos elos e conseqüentemente os tensores de inercia, que podem ser definidos em relação a qualquer SR $\{i\}$, com $i = 0, \dots, 4$. No caso do robô SCARA, adotou-se o SR de cada elo localizado no Centro de Massa (CM) do corpo, além de considerar cada corpo análogo a um paralelepípedo, maciço e rígido. O CM pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k \\ l \\ q \end{bmatrix} \quad (28)$$

sendo k o comprimento ao longo do eixo X_p , l é a largura ao longo do eixo Y_i e q é a altura do paralelepípedo ao longo do eixo Z_p .

O tensor de inércia para cada corpo rígido, $i = 1, 2, 3$, pode ser obtido por:

$${}^c I_i = \begin{bmatrix} \frac{m_i}{12}(q_i^2 + l_i^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_i}{12}(k_i^2 + q_i^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_i}{12}(l_i^2 + k_i^2) \end{bmatrix} \quad (29)$$

sendo m a massa do elo.

B. Algoritmo Dinâmico Iterativo de Newton-Euler

Para obtenção das equações dinâmicas do robô, aplicou-se o algoritmo iterativo de Newton-Euler. Assim, determinaram-se as equações de torque τ para cada junta do robô do elo $i = 0 \rightarrow n - 1$.

A equação de velocidade angular:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (30)$$

sendo ${}^{i+1}\omega_{i+1}$ a velocidade angular do elo $\{i + 1\}$ em relação ao SR $\{i + 1\}$ e ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$ eixo de rotação do elo $\{i + 1\}$, nesse caso ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = [0 \ 0 \ 1]^T$.

A equação de aceleração angular:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i \omega_i + \dots \\ \dots {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (31)$$

sendo ${}^{i+1}\omega_{i+1}$ a aceleração angular do elo $\{i+1\}$ em relação ao SR $\{i+1\}$.

A equação de aceleração linear:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^{i+1}R({}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + \dots \\ \dots {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i) \end{aligned} \quad (32)$$

sendo ${}^{i+1}v_{i+1}$ a aceleração linear do elo $\{i+1\}$ em relação ao SR $\{i+1\}$.

A equação da aceleração linear do CM:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} &= {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + \dots \\ \dots {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \end{aligned} \quad (33)$$

sendo ${}^{i+1}v_{C_{i+1}}$ a aceleração linear do elo $\{i+1\}$ em relação ao seu CM e ${}^{i+1}P_{C_{i+1}}$ o vetor posição do CM do elo $\{i+1\}$.

A equação da força:

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (34)$$

sendo ${}^{i+1}F_{i+1}$ a equação de força em relação ao SR $\{i+1\}$.

A equação do torque:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}N_{i+1} &= C_{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + \dots \\ \dots {}^{i+1}\omega_{i+1} \times C_{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \end{aligned} \quad (35)$$

sendo ${}^{i+1}F_{i+1}$ a equação de torque em relação ao SR $\{i+1\}$ e $C_{i+1}I_{i+1}$ o tensor de inercia do elo $\{i+1\}$.

Para juntas prismáticas, deve-se usar as equações correspondentes as eqs. (31) e (32), respectivamente:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i \quad (36)$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^{i+1}R({}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + \dots \\ \dots {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i) + \dots \\ \dots 2 {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (37)$$

Após a realização das iterações descritas pelas Eqs. (31)-(35), finalizou-se algoritmo de Newton-Euler com as interações do elo $i = n \rightarrow 1$, assim houve a decomposição dos torques τ_i .

A equação de força:

$${}^i f_i = {}^i_{i+1}R {}^{i+1}f_{i+1} + {}^i F_i \quad (38)$$

sendo ${}^i f_i$ a força na junta $\{i\}$.

A equação de torque:

$$\begin{aligned} {}^i n_i &= {}^i N_i + {}^i_{i+1} R^{i+1} n_{i+1} + \dots \\ \dots {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^i_{i+1} R^{i+1} f_{i+1} \end{aligned} \quad (39)$$

sendo ${}^i n_i$ o torque na junta $\{i\}$.

A equação de torque decomposto sobre eixo de rotação ou translação:

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_i \quad (40)$$

sendo τ_i o torque orientado na junta $\{i\}$.

Após realizar as iterações para fora, Eqs. (31)-(35), e para dentro, Eqs. (38)-(40), são apresentados os torques calculados referentes a cada junta, sendo τ_1 e τ_2 os torques realizados nas juntas 1 e 2, respectivamente, e o τ_3 a força aplicada a junta prismático:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= (m_1 b_{cm}^2 + {}^c I_{zz1}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_2 (b^2 + 2bc_{cm} c_2 + c_{cm}^2) + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_2 (bc_{cm} c_2 + c_{cm}^2) + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_2 + \dots \\ \dots (m_3 (b^2 + 2bcc_2 + c^2) + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_3 (bcc_2 + c^2) + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= (m_2 (bc_{cm} c_2 + c_{cm}^2) + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_3 (bcc_2 + c^2) + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_3 c^2 + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_2 + (m_2 c_{cm}^2 + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_2 + \dots \\ \dots (m_2 bc_{cm} s_2) \dot{\theta}_1^2 + (m_2 bc_{cm} s_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dots \\ \dots (m_3 bcs_2) \dot{\theta}_1^2 + (m_3 bcs_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\tau_3 = m_3 \ddot{d} - m_3 g \quad (43)$$

Podem-se adequar as Eqs. (41)-(43) na forma de equação geral, expressada por:

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (44)$$

sendo τ o vetor de torques ($n \times 1$), $M(\theta)$ a matriz de inércia do manipulador ($n \times n$), $V(\theta, \dot{\theta})$ é o vetor dos termos Centrífugos e de Coriolis ($n \times 1$) e $G(\theta)$ é um vetor dos termos de Gravidade ($n \times 1$). Nota-se que os termos são dependentes de θ (posição), $\dot{\theta}$ (velocidade) e $\ddot{\theta}$ (aceleração).

No caso do robô SCARA modelo T3 401SS, a matriz de inérica, $M(\theta)$, da Eq. (44) se torna:

$$\begin{aligned} A_1 &= {}^c I_{zz1} + {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + b_{cm}^2 m_1 + \dots \\ \dots m_3 (b^2 + 2bcc_2 + c^2) + \dots \\ \dots m_2 (b^2 + 2bc_{cm} c_2 + c_{cm}^2) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + m_3 (c^2 + bcc_2) + \dots \\ \dots m_2 (c_{cm}^2 + bc_{cm} c_2) \end{aligned} \quad (46)$$

$$C_1 = 0 \quad (47)$$

$$M_1 = [A_1 \quad B_1 \quad C_1] \quad (48)$$

$$A_2 = {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + m_3(c^2 + bc c_2) + \dots \\ \dots m_2(c_{cm}^2 + bc_{cm} c_2) \quad (49)$$

$$B_2 = {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + m_3 c^2 + m_2 c_{cm}^2 \quad (50)$$

$$C_2 = 0 \quad (51)$$

$$M_2 = [A_2 \quad B_2 \quad C_2] \quad (52)$$

$$A_3 = 0 \quad (53)$$

$$B_3 = 0 \quad (54)$$

$$C_3 = m_3 \quad (55)$$

$$M_3 = [A_3 \quad B_3 \quad C_3] \quad (56)$$

A matriz M será composta pelas Eqs. (48), (52) e (56), expresso por:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Analogamente para o vetor V (θ, θ'), Eq. (44), obtém-se:

$$V_1 = 0 \quad (58)$$

$$V_2 = (bcm_3 s_2 + bc_{cm} m_2 s_2) \dot{\theta}_1^2 + \dots \\ \dots (bcm_3 s_2 + bc_{cm} m_2 s_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (59)$$

$$V_3 = 0 \quad (60)$$

$$V = [V_1 \quad V_2 \quad V_3] \quad (61)$$

O último vetor, G(θ), da Eq. (44), obtém-se.

$$G_1 = 0 \quad (62)$$

$$G_2 = 0 \quad (63)$$

$$G_3 = -gm_3 \quad (64)$$

$$G = [G_1 \quad G_2 \quad G_3] \quad (65)$$

Para realizar a simulação, torna-se necessário isolar a variável $\ddot{\theta}$ da Eq. (44), da forma:

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1}(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)) \quad (66)$$

Para executar a iteração ponto a ponto, discretizou-se o tempo para realizar a integração numérica, a partir da Eq. (66), obtém-se:

$$\dot{\theta} = \dot{\theta} + T_x \ddot{\theta} \quad (67)$$

$$\theta = \theta + T_x \dot{\theta} \quad (68)$$

sendo T_x a taxa de amostragem.

Na próxima seção, será usada a Equação (44) para realização do controle do robô manipulador.

6 | CONTROLE NÃO LINEAR

Concluída a modelagem dinâmica, deseja-se que os elos do robô manipulador sigam determinadas trajetórias. Desse modo, realiza-se o controle de torque dos atuadores de forma a alcançar a posição final desejada de maneira suave.

Existem estratégias de controle aplicadas aos manipuladores robóticos, essas podem ser classificadas como lineares ou não lineares. Para o caso de não linearidades tênues, torna-se possível a linearização local, obtém-se modelos lineares que aproximam as equações não lineares na vizinhança do ponto de operação. Contudo, o problema de controle de um robô manipulador não é adequado para essa abordagem.

Portanto, busca-se uma lei de controle a qual não negligencie as não linearidades intrínsecas do robô de modo que o sistema de controle seja criticamente amortecido, sendo descrito pelo sistema em malha aberta na Equação (44).

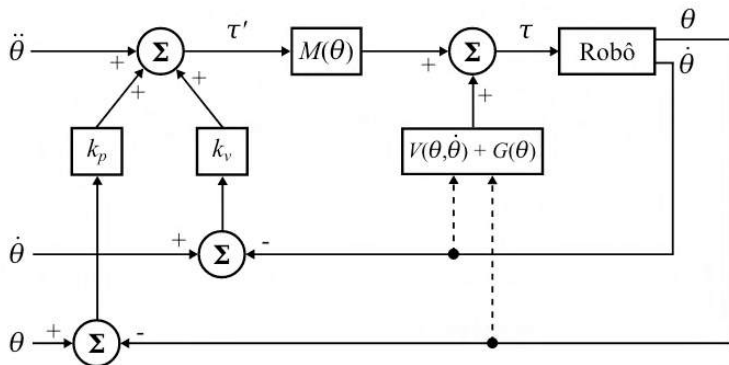


Fig. 3. Diagrama de controle em malha fechada. Adaptado de [7]

Na Figura 3, representa-se o diagrama de controle em malha fechada do sistema. A partição da lei de controle, obtém-se o seguinte modelo:

$$\tau = \alpha \tau' + \beta \quad (69)$$

sendo $\alpha = M(\theta)$, $\beta = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$, e τ' a partição do servo expressa por:

$$\tau' = \ddot{\theta} + k_v \dot{e} + k_p e \quad (70)$$

sendo k_p é o ganho de posição, k_v é o ganho de velocidade, e é o erro de posição e e' é o erro de velocidade, dado por:

$$e = \theta_f - \theta_a \quad (71)$$

O erro de velocidade, e' , expresso por:

$$\dot{e} = \dot{\theta}_f - \dot{\theta}_a \quad (72)$$

sendo θ_f é a posição final desejada, θ_a a posição atual do robô, $\dot{\theta}_f$ a velocidade final desejada e $\dot{\theta}_a$ a velocidade atual do robô. Os parâmetros k_p e k_v são calculados com base nas especificações de desempenho do projeto.

Quanto a implementação computacional, discretiza-se Eqs.(44), em seguida: (i) determinam-se as variáveis de posição (θ), velocidade ($\dot{\theta}$) e aceleração ($\ddot{\theta}$); (ii) calculam-se os erros de posição (e) e velocidade (e'), descrito na Eq. (71); (iii) calcula-se a partição do servo (τ'), conforme Eq. (70); e (iv) computa-se a equação de malha aberta, de acordo com a Equação (69).

Afim de implementar a lei de controle, isolou-se $\ddot{\theta}$ na Equação (44), como segue:

$$\ddot{\theta} = \alpha^{-1}(-\beta + \tau) \quad (73)$$

Nesta etapa da iteração, realizou-se a integração numérica e obtém-se $\dot{\theta}$ e θ , como expresso na equações (67) e (68).

Realimenta-se as variáveis de θ e θ' e retorna-se o laço iterativo até que a condição de parada seja alcançada.

71 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos a partir do software MATLAB®. Realizaram-se as simulações de trajetória e con-trole, a partir dos valores de posição, velocidade e aceleração desejadas para cada elo, $i = 1, 2, 3$, com os parâmetros apresentados na Tabela I.

Elos	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
m_i (Kg)	1,2	4,0	0,4
$CM_i(m)$ (10^{-3})	$b_{cm} = 112,5$	$c_{cm} = 87,5$	170,0
$k_i(m)$ (10^{-3})	90	129	8,57
$l_i(m)$ (10^{-3})	$b = 225$	$c = 175$	8,57
$q_i(m)$ (10^{-3})	35	176	340,7
${}^c I_{xx_i}$ (10^{-6})	10400	38100	3900
${}^c I_{yy_i}$ (10^{-6})	900	16000	3900
${}^c I_{zz_i}$ (10^{-6})	11000	33300	4,8963
θ_i Inicial (rad)	0	0	0
$\dot{\theta}_i$ Inicial (rad/s)	0	0	0
θ_i Final (rad)	π	$-\pi$	0,15
$\dot{\theta}_i$ Final (rad/s)	0	0	0
$\ddot{\theta}_i$ Final (rad/s ²)	0	0	0
g (m/s^2)	9,8	9,8	9,8
k_{p_i}	1	0,25	4
k_{v_i}	2	1	4
T_{x_i} (s)	0,001	0,001	0,001

TABELA I - PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

A. Geração da trajetória

Gerou-se o gráfico da trajetória, com as condições apresentadas nas Eqs. (17)-(19), para determinar os coeficientes descritos nas Eqs. (24)-(27). Nas Figuras 4-6, ilustram-se os comportamentos temporais dos elos $i = 1, 2, 3$.

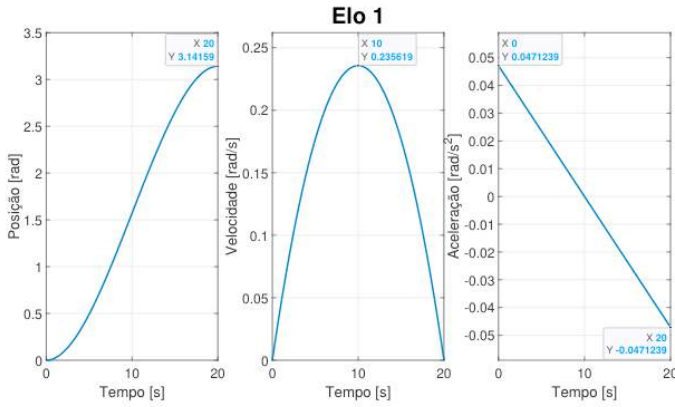


Fig. 4. Trajetória do elo 1

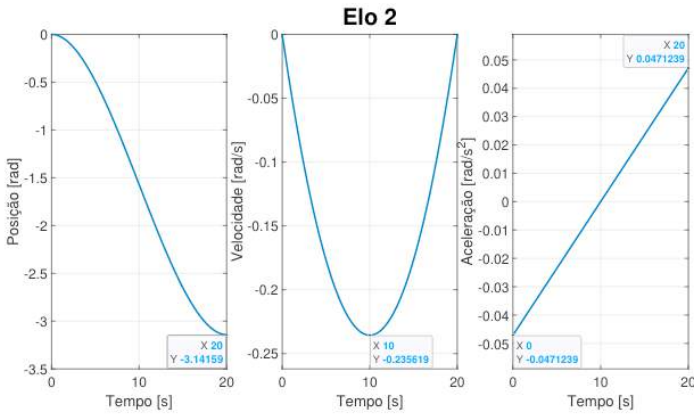
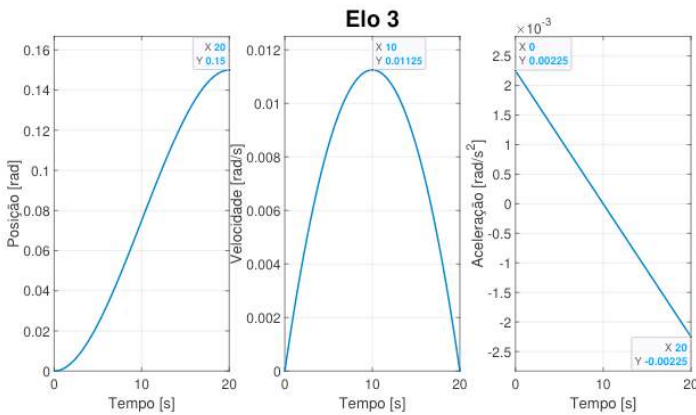


Fig. 5. Trajetória do elo 2



B. Controle

Na etapa de controle, calcularam-se as Eqs. (57), (61) e (65), as quais compõem a dinâmica do robô e computou-se o sistema de controle em malha fechada. Para simulação, foram usados os parâmetros apresentados na Tabela I e tempo de amostragem de 0,001s. Nas Figuras 7-9, ilustram-se os resultados numéricos quanto ao comportamento temporal dos elos do robô RRP.

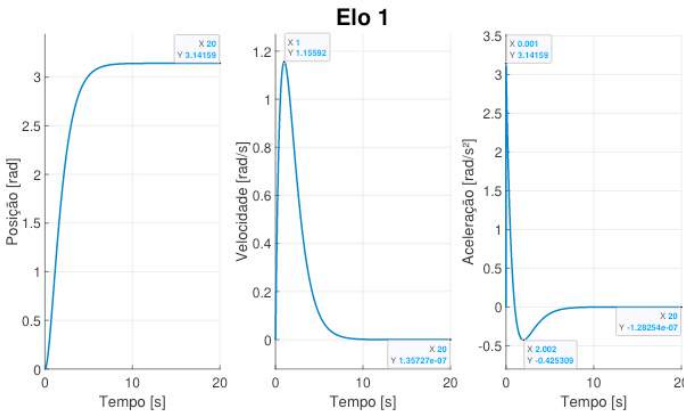


Fig. 7. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 1

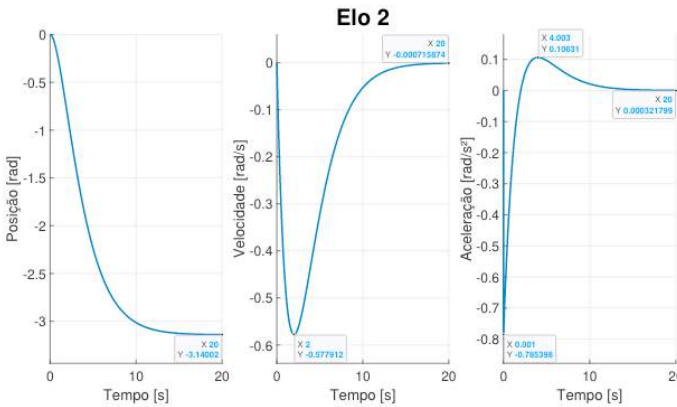


Fig. 8. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 2

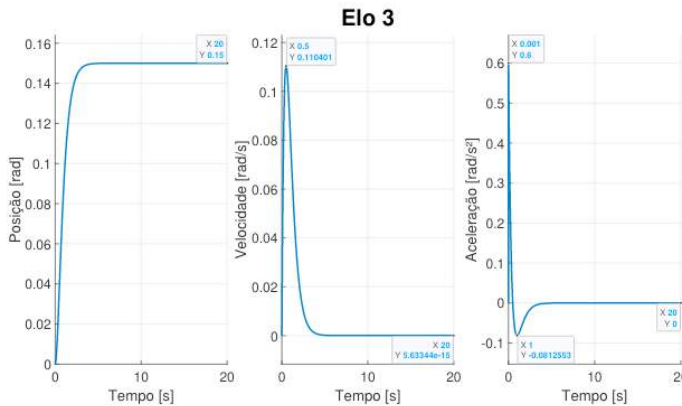


Fig. 9. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 3

8 | CONCLUSÃO

Desenvolveu-se a modelagem matemática da cinemática e da dinâmica do robô SCARA T3 401SS da empresa EPSON, assim como aplicou-se uma estratégia de controle não linear. A dinâmica foi realizada a partir do método iterativo de Newton-Euler, o qual forneceu o sistema de equações de torque para posteriormente ser realizado o controle dos atuadores a partir das mesmas.

Realizou-se a simulação e análise dos gráficos de posição, velocidade e aceleração das juntas, afim de verificar a coerência dos resultados obtidos.

Validou-se a modelagem por meio dos resultados, dessa forma se evidenciou a possível utilização desse modelo para simulação e projeto de robôs com juntas rotativas e prismática, uma vez que o modelo matemático é genérico. Dessa forma possibilita a adequação dos parâmetros de outros robôs, isso auxilia profissionais da área a verificação teórica dos resultados, antes da aplicação prática.

REFERÊNCIAS

[1] IFR (1993-2021). *World Robotics: Industrial Robots*. Frankfurt am Main: VDMA Services GmbH, p. 12-14. Disponível em: <https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf> Acessado em 06 de julho de 2022

[2] CNI – Confederação Nacional da Indústria. *Investimentos em indústria 4.0 / Confederação Nacional da Indústria*. Brasília, 2018. Disponível em: <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/8b/0f/8b0f5599-9794-4b66-ac83-e84a4d118af9/investimentos_em_industria_40_junho2018.pdf>. Acessado em 06 de julho de 2022

[3] CHAGAS, FÁBIO SUIM. MANIPULADOR BILATERAL COM REALIMENTAÇÃO HÁPTICA. 2005. Tese de Doutorado. INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. Disponível em: <<http://www.comp.ime.eb.br/pos/modules/files/dissertacoes/2005/2005-FabioChagas.pdf>> Acessado em 07 de julho de 2022.

[4] SEIKO EPSON CORPORATION. *Epson T-Series Robot Manual*. Rev. 12, 2020. Disponível em: <[https://files.support.epson.com/far/docs/epson_t-series_robot_manual_\(r12\).pdf](https://files.support.epson.com/far/docs/epson_t-series_robot_manual_(r12).pdf)> Acessado em 06 de julho de 2022.

[5] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Coordenação do curso de Engenharia Eletrônica. Disponível em: <<https://portal.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/graduacao/campo-mourao/cm-engenharia-eletronica>> Acessado em 06 de julho de 2022.

[6] CRAIG, J. J.. *Robótica*. 3ª edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2012

[7] SEIKO EPSON CORPORATION. *Robôs SCARA All-In-One Epson Synthis T3*. Disponível em <<https://epson.com.br/Para-empresas/Rob%C3%B3tica/Rob%C3%B4s-SCARA/Rob%C3%B4s-SCARA-All-In-One-Epson-Synthis-T3/p/RT3-401SS.>> Acessado em 2

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA SOB A FORMA DE HIDROGÊNIO (SAEEH₂) INSTALADO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA UTILIZANDO O SOFTWARE HOMER

Data de aceite: 01/08/2022

Juarez Corrêa Furtado Júnior

Universidade Estadual de Campinas

Ennio Peres da Silva

Universidade Estadual de Campinas

Vitor Feitosa Riedel

Universidade Estadual de Campinas

Ana Beatriz Barros Souza

Universidade Estadual de Campinas

Hélio Nunes de Souza Filho

Universidade Estadual de Campinas

Demóstenes Barbosa da Silva

BASE Energia Sustentável

Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa

BASE Energia Sustentável

Thiago Dias Alencar Ferreira

Companhia Energética de São Paulo

RESUMO: O hidrogênio proveniente de fontes renováveis tem o potencial técnico de canalizar grandes quantidades de eletricidade renovável para setores onde a descarbonização é difícil. Neste sentido, o hidrogênio vem sendo aplicado em diversos projetos no mundo. No Brasil, projetos de P&D vem sendo desenvolvidos utilizando a tecnologia do hidrogênio associado às fontes renováveis, como o projeto de armazenamento de energia elétrica desenvolvido pela CESP na UHE de Porto Primavera, no escopo da Chamada

Estratégica n° 21, proposta pela ANEEL em 2016. Diante desta discussão, o enfoque deste estudo foi de apresentar uma simulação do SAEEH₂ através do software HOMER, com o objetivo de estimar uma carga que pode ser atendida, bem como visualizar a operação do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Armazenamento de energia. Excedente de energia. Fontes renováveis. Hidrogênio.

ABSTRACT: Hydrogen from renewable sources has the technical potential of channeling large amounts of electricity to industries where renewable decarbonization is difficult. In this sense, hydrogen has been applied in several projects around the world. In Brazil, R&D projects have been developed using resource technology associated with renewable sources, such as the electric energy storage project developed by CESP at the Porto Primavera Plant, within the scope of strategic n° 21, proposed by ANEEL in 2016. From this discussion, the focus of this study was to present a simulation of the SAEEH₂ through the HOMER software, with the objective of estimating a load that can be met, as well as visualizing the operation of the system.

KEYWORDS: Energy management. Energy surplus. Renewable sources. Hydrogen.

1 | INTRODUÇÃO

Na última década, o aumento da demanda de energia e a busca por alternativas que promovam a garantia e a segurança no suprimento se tornaram essenciais por

instituições governamentais em todo o mundo. A expansão da participação de fontes renováveis de energia como a solar e eólica, com a utilização adequada de suas capacidades de geração de energia, tornou-se imprescindível para se atingir um futuro energético sustentável (1).

No entanto, as fontes renováveis estão sujeitas a efeitos de sazonalidade e intermitência. Logo, o uso intensivo dessas fontes expõe a geração de eletricidade a efeitos adversos tais como instabilidade no regime de chuvas, incidência solar, e de ventos, dentre outros. Estes fatores podem influenciar negativamente a segurança, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Uma alternativa que pode contribuir para reduzir esses problemas, são os sistemas de armazenamento de energia, que oferecem a possibilidade de prover melhor qualidade da energia elétrica e aumentar a confiabilidade, a segurança e a disponibilidade do suprimento energético (2).

A adoção das tecnologias de armazenamento permite maximizar o aproveitamento da energia renovável, de modo que nos períodos de elevada oferta dessas fontes, a parcela que excede a demanda é armazenada. O montante armazenado pode ser utilizado nos períodos de elevada demanda, contribuindo para uma maior estabilidade do sistema, além de maior penetração das fontes renováveis (2), (3).

Existem diversas formas de armazenar a energia elétrica produzida a partir das fontes renováveis, com destaque para o armazenamento na forma de hidrogênio. Hidrogênio e energia têm uma longa história compartilhada – alimentando os primeiros motores de combustão interna há mais de 200 anos para se tornar parte integrante da indústria de refino moderna. É leve, armazenador, energético e não produz emissões diretas de poluentes ou gases de efeito estufa. O número de países com políticas que apoiam diretamente o investimento em tecnologias de hidrogênio está aumentando, juntamente com o número de setores que eles visam. Até 2018, existiam cerca de 50 metas e incentivos políticos em vigor que apoiam diretamente o hidrogênio, com a maioria focada no transporte (4).

No Brasil, visando a promoção da área de armazenamento de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, fez uma chamada pública de projetos que atendam à temática do armazenamento, Chamada ANEEL N°. 021/2016 - Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”. Trata-se de uma iniciativa para dar início às abordagens experimentais do tema no contexto nacional (3). No âmbito da Chamada N° 21, a Companhia Energética de São Paulo, CESP, desenvolveu o Projeto de P&D “Análise da Eficiência do Armazenamento Complementar de Energia Junto a Usinas Hidrelétricas, Utilizando Tecnologias de Armazenamento Eletroquímico e em Hidrogênio”, sob Código ANEEL PD-00061-0054/2016, utilizando, além do armazenamento de eletricidade na forma de hidrogênio, baterias avançadas.

Nesse projeto, o Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica (SAEE) desenvolvido é composto, basicamente, por um eletrolisador de água, um tanque

pressurizado para estocagem de hidrogênio, uma célula a combustível, além de um sistema auxiliar de armazenamento eletroquímico composto por um banco de baterias. Esse sistema será instalado junto a UHE Eng. Sérgio Mota (Porto Primavera), local no qual a CESP desenvolve outros projetos relacionados à geração de eletricidade através de fontes renováveis. Dentre esses projetos, tem-se um total de 1.050 kW_p de geração solar fotovoltaica, com uma produção média correspondente a 5.070 kWh de eletricidade, a um fator de capacidade de 20%.

O Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica com Hidrogênio (SAEEH₂) é composto, basicamente, por um eletrolisador de água com 107 kW, reservatório pressurizado para estocagem de hidrogênio com capacidade de 600 Nm³ (CNTP), uma célula a combustível (CaC) de 100 kW, além de um sistema auxiliar de armazenamento eletroquímico composto por um banco de baterias. Embora o projeto inicial contemplasse equipamentos de maior capacidade, os valores anteriormente mencionados foram determinados de modo a atender tanto o orçamento previsto no projeto, como para permitir uma maior participação da indústria nacional, fator desejável em um projeto de pesquisa e desenvolvimento e fortemente incentivado na Chamada N° 21 da ANEEL. A escolha dos fornecedores foi feita segundo critérios que avaliaram a experiência no fornecimento dos equipamentos, o tipo de tecnologia empregada, assistência técnica, cumprimento aos prazos de entrega e grau de nacionalização (5).

Diante desta discussão, o enfoque deste estudo foi de apresentar uma simulação do SAEEH₂ através do software HOMER, com o objetivo de estimar uma carga que pode ser atendida, bem como visualizar a operação do sistema.

2 | PROJETO DE P&D DESENVOLVIDO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA

A usina hidrelétrica Eng. Sérgio Mota (Porto Primavera) localiza-se no Rio Paraná, possui potência fiscalizada de 1.540 MW, e está localizada no município de Rosana no estado de São Paulo (8). Junto a essa hidrelétrica, a CESP desenvolve diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento relacionados a geração de energia elétrica através de fontes renováveis, possuindo plantas fotovoltaicas que utilizam diversos tipos de tecnologias (5).

O projeto tratado neste capítulo, intitulado “Análise da Eficiência do Armazenamento Complementar de Energia junto a Usinas Hidrelétricas, utilizando Tecnologias Eletroquímicas e de Armazenamento de Hidrogênio” é um dos 23 projetos aprovados na Chamada Estratégica n° 21 da ANEEL de 2016.

O sistema de armazenamento de energia elétrica instalado na UHE Porto Primavera é composto por um eletrolisador capaz de produzir até 20 Nm³.h⁻¹ de hidrogênio, um reservatório pressurizado com capacidade de armazenamento de até 600 Nm³ (2.124 kWh), a uma pressão de até 25 bar e uma célula a combustível que entrega até 100 kW de potência elétrica para a rede. Inclui também um banco de baterias de íon-lítio com uma

potência de até 250 kW e capacidade de até 1.800 MJ (500 kWh) de armazenamento. Os dois sistemas armazenam e despacham a eletricidade proveniente de uma planta solar fotovoltaica de 400 kWp (6). Na Figura 1 é possível visualizar os equipamentos instalados na usina.



Figura 1 – Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica na forma de hidrogênio instalado na UHE de Porto Primavera (6)

A partir da Figura 1, tem-se os componentes do SAEE, juntamente com seus fabricantes e principal característica de operação. Para integrar as plantas solares com o SAEEH₂ desse projeto, é importante conhecer o seu comportamento quando operando em conjunto, bem como a carga que esse sistema pode atender, que justifica a simulação da operação desse sistema. A primeira etapa para a avaliação do sistema consiste em determinar a produção de energia nessas plantas, sendo necessário a obtenção dos dados solarimétricos no local de instalação dessas plantas.

2.1 Dados Solarimétricos de Rosana-SP

As coordenadas geográficas da UHE de Porto Primavera, no ponto em que as plantas fotovoltaicas serão construídas são 22°28'31"S; 52°57'30"W. De acordo com dados do CRESESB (Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólica Sergio Brito), órgão vinculado ao centro de pesquisas da ELETROBRAS, a estação solarimétrica de Rosana-SP é a mais próxima do local de instalação das plantas fotovoltaicas, localizada a 2,9 km da mesma.

Na Tabela 1, são apresentadas as médias de irradiação de acordo com o CRESESB, e estão disponíveis em (7). Embora o software utilizado nesse estudo, o HOMER, utilize a

base de dados da NASA, optou-se por utilizar os dados fornecidos pelo CRESESB, visto que essa base de dados leva em consideração medidas reais de uma estação solarimétrica próxima a UHE de Porto Primavera. A Tabela 1 apresenta os dados solarimétricos segundo o CRESESB e da base de dados do HOMER.

Estação	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]													
	Distância (km)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Rosana (SP)	2,9	6	6,11	5,52	4,69	3,73	3,36	3,54	4,46	4,74	5,47	6,12	6,55	5,02
Anaurilandia (MS)	8,3	5,97	5,98	5,49	4,72	3,77	3,4	3,58	4,5	4,76	5,42	6,13	6,5	5,02
Bataypora (MS)	9,7	6,01	6,01	5,5	4,73	3,72	3,39	3,57	4,52	4,74	5,45	6,14	6,49	5,02
Dados solarimétricos da estação de Rosana - Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]														
Ângulo	Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano horizontal	0° N	5,97	5,98	5,49	4,72	3,77	3,4	3,58	4,5	4,76	5,42	6,13	6,5	5,02
Ângulo igual a latitude	18° N	5,42	5,71	5,66	5,35	4,62	4,35	4,49	5,29	5,06	5,3	5,63	5,79	5,22
Dados solarimétricos do HOMER [kWh/m ² .dia]														
Ângulo igual a latitude (HOMER)	18° N	5,85	5,66	5,33	4,74	3,79	3,58	3,97	4,60	4,77	5,61	6,20	6,13	5,85

Tabela 1 – Dados solarimétricos de Itumbiara segundo CRESESB (7)

Conforme a Tabela 1, a irradiação média diária para o ângulo de inclinação igual a latitude de Rosana-SP corresponde a 5,22 kWh.m⁻².dia⁻¹, valor que será considerado para o cálculo da produção de energia na planta solar fotovoltaica.

2.2 Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica na UHE Porto Primavera

Nesses sistemas é importante levar em consideração as eficiências dos equipamentos como inversores de frequência e transformadores. Nesse estudo, para os transformadores a eficiência considerada corresponde a 98%, e para os inversores de frequência a eficiência corresponde a 95% (8). A Figura 2 apresenta esquematicamente o sistema de armazenamento a ser instalado na UHE de Porto Primavera.

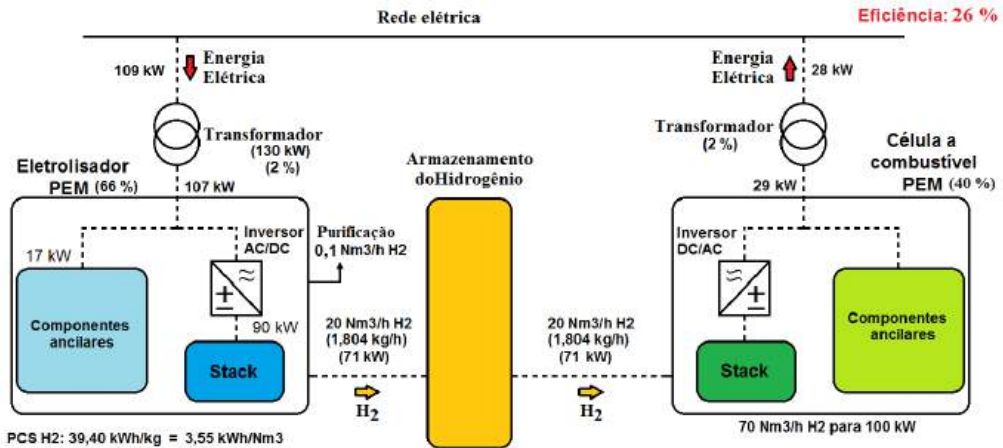


Figura 2 – SAEH₂ instalado na UHE de Porto Primavera (5)

O cálculo prévio do sistema de armazenamento a hidrogênio, descrito em detalhe nesse estudo, apontou que, após a complementação desse sistema com os dispositivos elétricos necessários, como transformadores, pode-se esperar uma eficiência global correspondente a 26 %.

Embora esse valor seja relativamente baixo, deve-se levar em consideração que o sistema de estocagem de energia permite o consumo posterior de uma parcela da eletricidade que em grande parte não seria aproveitada, o que significa uma melhor utilização dos recursos disponíveis.

Além disso, tem-se a possibilidade de fornecer energia renovável nos horários de ponta, melhorando o retorno financeiro da planta e produzindo créditos ambientais, por reduzir a geração térmica por combustíveis fósseis. Nesse estudo, considera-se que o sistema de armazenamento foi utilizado para normalizar a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, ou seja, a carga atendida pelo sistema é constante ao longo do dia.

2.3 Simulação da integração das plantas fotovoltaicas com o SAEH₂

Existem diversos softwares utilizados para a simulação de sistemas energéticos com fontes renováveis de energia. O software *Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables* (HOMER), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) foi escolhido para a simulação desse sistema. Essa escolha se deve ao fato de que esse software é a ferramenta de simulação mais utilizada para a análise de sistemas de armazenamento de energia, e permite a utilização da base de dados da NASA. Além disso, o HOMER possui em sua biblioteca modelos de painéis fotovoltaicos, aerogeradores, eletrolisadores, e células a combustível, que facilitam a modelagem do sistema a ser simulado (9).

Nas simulações não foram inseridos os bancos de baterias, visto que o objetivo

desse estudo é a simulação apenas do sistema de armazenamento de energia na forma de hidrogênio. Além disso, considerou-se que a carga a ser atendida é constante ao longo do dia, com os parâmetros utilizados nessa simulação sendo:

- **Eletrolisador:** 107 kW; Produção de 20 Nm³/h de H₂; Consumo elétrico de 5,76 kWh/Nm³
- **Tanque:** Volume equivalente de 600 Nm³ (54 kg); pressão máxima de 24 bar e volume inicial correspondente a 70% do total. O volume final deve ser igual ou superior ao inicial.
- **Célula a Combustível:** 100 kW, Produção de 1,42 kWh/Nm³; Consumo de 70Nm³/h de H₂; η=40%.
- **Inversores de frequência e retificadores:** Eficiência de 95%

Em um primeiro momento, foi realizada a simulação, considerando a capacidade instalada de todas as plantas fotovoltaicas, a qual corresponde a 1.050 kW_p. No entanto, a simulação mostrou que essa capacidade é elevada para as dimensões do sistema de armazenamento de energia elétrica, de modo que a maior parte da energia solar fotovoltaica produzida não é aproveitada conforme apresentado na Figura 3.

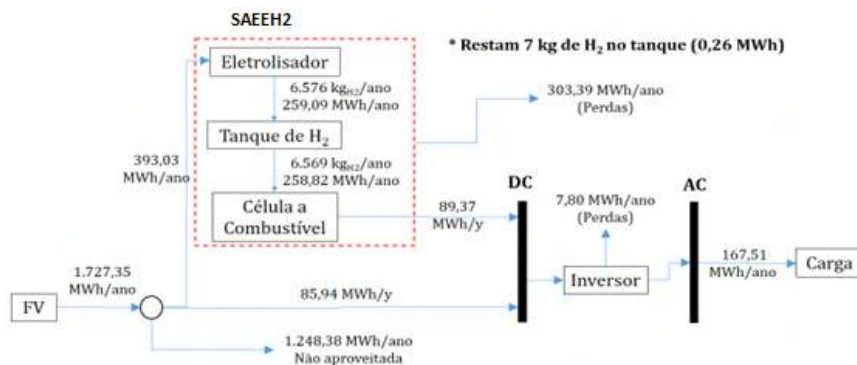


Figura 3 - Balanço de energia para a planta de 1.050 kW_p

Em virtude da maior parte da energia produzida não ser aproveitada devido a diferença entre a capacidade da planta solar e do SAEH₂, optou-se por considerar apenas a simulação do sistema com a planta de 400 kW_p a ser construída. Nesse caso, embora também haja uma parcela relevante da energia solar fotovoltaica não aproveitada pelo SAEH₂, essa parcela é consideravelmente inferior ao caso da planta de 1.050 kW_p, que leva em consideração todas as plantas fotovoltaicas existentes. De modo análogo, a Figura 4 apresenta o balanço de energia para o caso com a planta solar fotovoltaica de 400 kW_p.

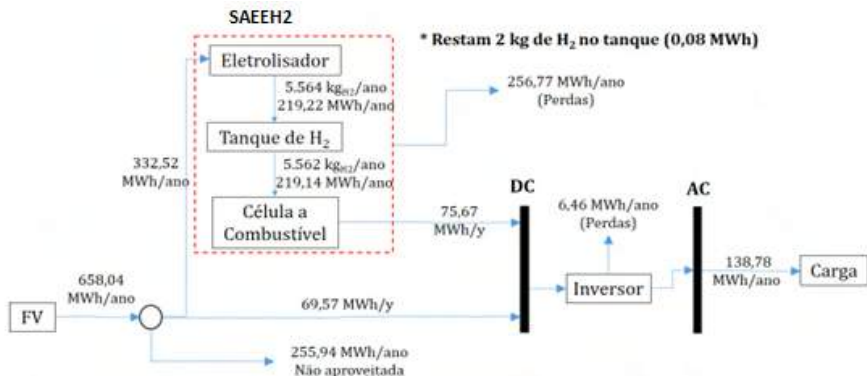


Figura 4 - Balanço de energia para a planta de 400 kW_p

Nesse caso, verificou-se que a carga máxima que pode ser atendida através desse sistema corresponde a 138,78 MWh, ao passo que 255,94 MWh não são aproveitados pelo sistema. Isso se deve a diferença entre a capacidade componentes do sistema de armazenamento (eletrolisador e célula a combustível), e a planta solar fotovoltaica de 400 kW_p. De fato, as capacidades dos equipamentos do SAEH₂ são inferiores aos originalmente projetados, e as alterações feitas foram motivadas por fatores de natureza econômica, além de outros aspectos que visam atender as exigências de um de projeto de pesquisa e desenvolvimento.

Conforme mencionado anteriormente, a carga do sistema é constante ao longo do dia, de modo que a energia para atender a carga simulada corresponde a 380,5 kWh/dia, equivalente ao fornecimento contínuo de 18,85 kW. Em termos gerais a eficiência global do sistema corresponde a 21,10%, ao passo que a eficiência do SAEH₂ (eficiência *round-trip*) corresponde a 22,75%. O esquema do SAEH₂ com a planta solar modelado no software é apresentado na Figura 5.

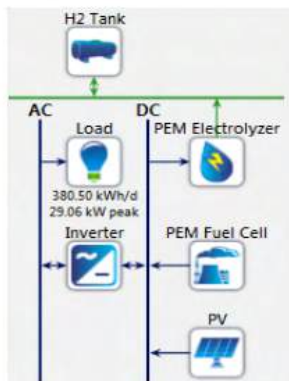


Figura 5 - Interface do SAEH₂ com a planta solar modelado no HOMER

3 | ASPECTOS OPERACIONAIS

Aspectos operacionais como o comportamento ao longo do ano para cada hora do dia da geração solar fotovoltaica, consumo do eletrolisador e a geração de eletricidade através da célula a combustível são de grande importância e estão apresentados na Figura 6.

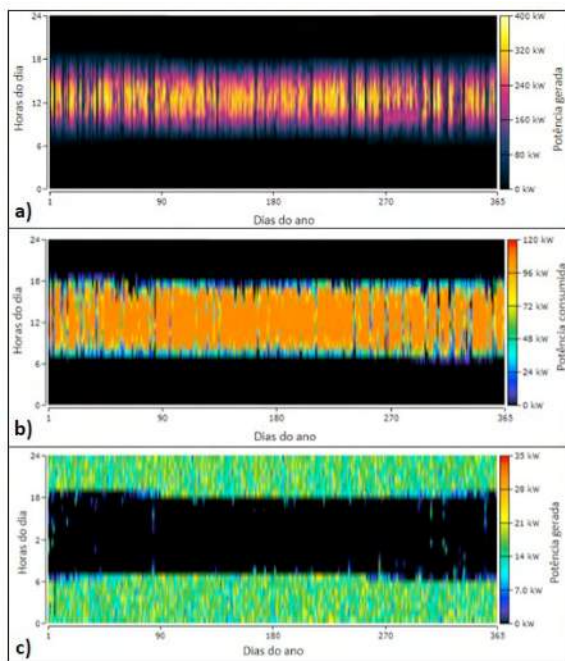


Figura 6 - Comportamento dos elementos do sistema ao longo do ano para cada hora do dia. a) geração solar fotovoltaica; b) potência consumida pelo eletrolisador; c) Geração através da célula a combustível

Na Figura 6a, observa-se a que geração solar fotovoltaica tem sua produção concentrada entre as 8 e as 18 horas, com o pico de geração ocorrendo ao meio-dia, como já conhecido. Além disso, entre o dia 270 até próximo ao dia 330 (meses de setembro e outubro), tem-se uma redução na geração solar fotovoltaica, podendo ser observado um maior grau de intermitência na geração. Um comportamento similar, porém, de menor intensidade pode ser observado entre dezembro e fevereiro, o que pode ser atribuído ao período de chuva, e embora esse seja o período de maiores valores de irradiação, tem-se a geração de energia elétrica reduzida. Isso tem efeito na quantidade de hidrogênio produzido, visto que o excesso de energia é destinado ao eletrolisador.

Nota-se na Figura 6b que nos períodos compreendidos entre às 8 e as 18 horas, nos quais ocorreram redução da geração solar fotovoltaica, existem lacunas na potência

consumida pelo eletrolisador, indicando redução da produção de H_2 . Além disso, na Figura 6c tem-se a geração de energia através da célula a combustível, e observa-se que a operação da célula é responsável pela geração em períodos tais como o compreendido entre as 8 e às 18 horas, atuando para suprir as lacunas da geração solar, e alimentando a carga.

A célula a combustível, também fornece energia para o sistema quando não há geração solar disponível. Nota-se que as Figuras 6a e 6c são complementares, de modo que a carga de 18,85 kW, valor próximo ao indicado pela escala de cor, sempre é atendida pelos painéis fotovoltaicos ou pela célula a combustível. Em relação a energia destinada ao eletrolisador, de acordo com a escala de cores, na maior parte do tempo os valores são próximos a potência máxima do eletrolisador de 107 kW.

Já em relação a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, nos períodos de pico (meio-dia) são gerados cerca de 350 kW, ao passo que a carga do sistema somado ao consumo do eletrolisador corresponde a cerca de 128 kW.

Outro aspecto importante a ser observado é o nível do tanque conforme apresentados na Figura 7.

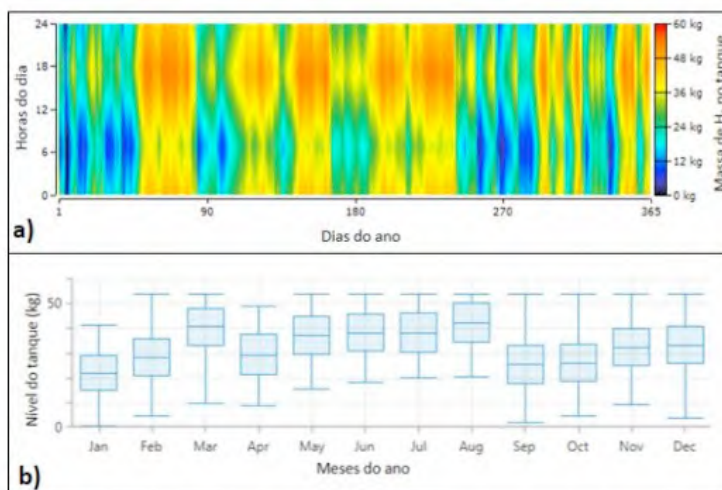


Figura 7 - a) Massa de H_2 contida no tanque ao longo do ano para cada hora do dia; b) Variação do nível do tanque de H_2 ao longo do ano

A Figura 7a, mostra que durante diversos períodos do ano o tanque opera com a sua capacidade máxima, tal como nos meses de março, maio e agosto. Nesses períodos, caso houvesse tanques adicionais, uma quantidade maior de hidrogênio poderia ser produzida e armazenada, visto que quando há uma parcela relevante da energia solar fotovoltaica que não é aproveitada, o que contribuiria para um maior aproveitamento da energia disponível.

Além disso, o nível do tanque acompanha a geração fotovoltaica, de modo que a

redução da geração implica em menores níveis. Em termos da amplitude da variação do nível do tanque entre os meses de janeiro, fevereiro junto a setembro e dezembro os níveis do tanque atingem níveis próximos a zero, conforme pode ser observado na Figura 6b. Por outro lado, somente nos meses de janeiro e abril o tanque não atinge a sua capacidade máxima, o que reforça o fato de que caso o volume de armazenamento fosse ampliado, uma quantidade maior de hidrogênio poderia de produzido.

4 | CONCLUSÃO

Esse estudo teve como objetivo apresentar os aspectos do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D-0061-0054/2016, bem como a carga que pode ser atendida com o mesmo. Para uma planta de solar fotovoltaica de 400 kW_p, a carga contínua que pode ser atendida ao longo de um dia corresponde a apenas 18,85 kW_p. Esse valor é consideravelmente baixo, devido principalmente a baixa eficiência do sistema de armazenamento. No entanto, embora o SAEEH₂ possua eficiência relativamente baixa (22,75%), deve-se observar que esse sistema permite suprir uma carga durante todo o dia, através de painéis fotovoltaicos.

Além disso, observou-se uma quantidade considerável de energia que não é aproveitada em virtude da diferença entre a capacidade da planta solar fotovoltaica, e a capacidade do SAEEH₂. Isso ocorre devido a questões relacionadas a adequação do orçamento do projeto, ajuste de preços, além da necessidade de seleção de equipamento aptos a atender a indústria nacional. Questões como essas embora influenciem no desempenho do sistema, podem ocorrer em projetos de P&D.

REFERÊNCIAS

- (1) Kouchachvili, L.; Entchev, E. Power to gas and H₂ /NG blend in SMART energy networks concept. Renewable Energy, 2018.
- (2) IEA Tracking Clean Energy Progress 2017, June, 2017.
- (3) ANEEL (2016). Chamada nº 021/2016. Projeto Estratégico “Arranjos Técnicos e Comerciais Para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro” Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília –DF. 2016.
- (4) IEA Tracking Clean Energy Progress 2017, June, 2017.
- (5) CESP (2018). O projeto de armazenamento de energia elétrica da CESP: motivação, arranjo e equipamentos. Seminário: Estado da Arte do Armazenamento de Energia e Inserção de Fontes Renováveis. Universidade de São Paulo, 19 e 20 de Março, 2018. São Paulo, Brasil. Disponível em http://www.iee.usp.br/sites/default/files/5-Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20IEEUSP_19-03-2018.pdf.

- (6) Riedel, V. F. Análise técnica de um sistema de armazenamento de energia elétrica produzida por fontes renováveis utilizando sistemas de baterias e células a combustível a hidrogênio. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP: [s.n], 2019.
- (7) CRESSES (2019) Potencial Solar – Sun Data v 3.0. Centro de referência para as energias Solar e Eólica Sergio Brito. CEPEL. Rio de Janeiro –RJ. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>.
- (8) Shahzad, M. K., Zahid, A., Rashid, T., Rehan, M. A., Ali, M., & Ahmad, M. (2017). Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software. *Renewable Energy*, 106, 264–273.
- (9) Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., & Leahy, M. (2010). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, 87(4), 1059–1082.

SOBRE OS ORGANIZADORES

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Âodos 1, 5, 7, 8

Aprendizado de máquina 28

Aprendizagem de máquinas 41, 45

Armazenamento de energia 2, 6, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 136, 137

B

Bateria 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Busca harmônica 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 105, 107

C

Cátodos 1, 3, 4, 5, 9, 10, 12

Computação na nuvem 28, 36

Controle inteligente 95

Controle ótimo 95, 98

E

Electric system 14, 15, 16, 17, 25

Excedente de energia 126

F

Fontes renováveis 126, 127, 128, 131, 136, 137

H

Hidrogênio 126, 127, 128, 129, 131, 132, 134, 135, 136, 137

I

IBM Cloud 28, 29, 30, 39

Isoladores de potência 41, 42, 52

M

Máquinas de vetores de suporte 28, 31, 40, 45

Modelagem cinemática 108

Modelagem dinâmica 108, 119

Motor de indução trifásico 28, 29, 35

N

Nióbio 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

O

Otimização por enxame de partículas 45, 94, 95, 97, 100, 105

P

Photovoltaic solar power 15

Power generation forecasting 15

R

Regulador linear quadrático 94, 95, 96, 98, 105, 107

Renewable energy 14, 15, 16, 20, 25, 26, 27, 92, 131, 136, 137

Robô Scara T3 401SS 108

S

Sistema de controle não linear 108

Sistemas de transmissão de energia elétrica 41

Sistemas inteligentes 29, 41, 43, 44, 46, 48, 50, 51, 52


SPSS Modeler 28, 29, 30, 31, 37, 38


W


Wind power 14, 15, 17, 20, 21, 22, 24, 26


ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](#) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](#) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 