

Mariana Natale Fiorelli Fabiche
(organizer)

ENGINEERING

QUALITY, PRODUCTIVITY AND
TECHNOLOGICAL INNOVATION

Mariana Natale Fiorelli Fabiche
(organizer)

ENGINEERING

QUALITY, PRODUCTIVITY AND
TECHNOLOGICAL INNOVATION

Chief editor

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Executive editor

Natalia Oliveira

Editorial assistant

Flávia Roberta Barão

Librarian

Janaina Ramos

Graphic project

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

Cover pictures

iStock

Art edition

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright of the text © 2024 The authors

Copyright of the edition © 2024 Atena Editora

Rights for this edition granted to Atena Editora by the authors.

Open access publication by Atena Editora



All content in this book is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-NonDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).

The content of the articles and their data in their form, correctness and reliability are the sole responsibility of the authors, and they do not necessarily represent the official position of Atena Editora. It is allowed to download the work and share it as long as credits are given to the authors, but without the possibility of altering it in any way or using it for commercial purposes.

All manuscripts were previously submitted to blind evaluation by peers, members of the Editorial Board of this Publisher, having been approved for publication based on criteria of academic neutrality and impartiality.

Atena Editora is committed to ensuring editorial integrity at all stages of the publication process, avoiding plagiarism, fraudulent data or results and preventing financial interests from compromising the publication's ethical standards. Suspected scientific misconduct situations will be investigated to the highest standard of academic and ethical rigor.

Editorial board**Exact and earth sciences and engineering**

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

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

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

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Engineering: quality, productivity and technological innovation

Diagramming: Ellen Andressa Kubisty
Correction: Yaiddy Paola Martinez
Indexing: Amanda Kelly da Costa Veiga
Review: The authors
Organizer: Mariana Natale Fiorelli Fabiche

International Cataloging-in-Publication Data (CIP)	
E57	Engineering: quality, productivity and technological innovation / Organizer Mariana Natale Fiorelli Fabiche. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-2320-1 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.201240703 1. Engineering. I. Fabiche, Mariana Natale Fiorelli (Organizer). II. Título. CDD 620
Prepared by Librarian Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

AUTHORS' DECLARATION

The authors of this work: 1. Attest that they do not have any commercial interest that constitutes a conflict of interest in relation to the published scientific article; 2. They declare that they actively participated in the construction of their manuscripts, preferably in: a) Study design, and/or data acquisition, and/or data analysis and interpretation; b) Elaboration of the article or revision in order to make the material intellectually relevant; c) Final approval of the manuscript for submission; 3. They certify that published scientific articles are completely free from fraudulent data and/or results; 4. Confirm correct citation and reference of all data and interpretations of data from other research; 5. They acknowledge having informed all sources of funding received for carrying out the research; 6. Authorize the publication of the work, which includes the catalog records, ISBN (Internacional Standard Serial Number), D.O.I. (Digital Object Identifier) and other indexes, visual design and cover creation, interior layout, as well as the release and dissemination according to Atena Editora's criteria.

PUBLISHER'S DECLARATION

Atena Editora declares, for all legal purposes, that: 1. This publication constitutes only a temporary transfer of copyright, right to publication, and does not constitute joint and several liability in the creation of published manuscripts, under the terms provided for in the Law on Rights copyright (Law 9610/98), in art. 184 of the Penal Code and in art. 927 of the Civil Code; 2. Authorizes and encourages authors to sign contracts with institutional repositories, with the exclusive purpose of disseminating the work, provided that with due acknowledgment of authorship and editing and without any commercial purpose; 3. All e-books are open access, so it does not sell them on its website, partner sites, e-commerce platforms, or any other virtual or physical means, therefore, it is exempt from copyright transfers to authors; 4. All members of the editorial board are PhDs and linked to public higher education institutions, as recommended by CAPES for obtaining the Qualis book; 5. It does not transfer, commercialize or authorize the use of the authors' names and e-mails, as well as any other data from them, for any purpose other than the scope of dissemination of this work.

A coleção “Engineering: quality, productivity and technological innovation” é uma coleção de trabalhos científicos que aborda temas atuais e em destaques na área das Engenharias.

Dividida em capítulos categorizados e interdisciplinares, a obra apresenta estudos realizados em diversas instituições de ensino e pesquisa no Brasil e no exterior, abordando temas discutidos nas diversas áreas da engenharia, como um estudo sobre a redução de desperdício e o aumento da eficiência da produção de uma empresa; apresenta também um estudo de poços de petróleo com objetivo de propor medidas para aumentar a vida útil do mesmo; um estudo interessante de nanocompósito de metacrilato utilizando carbono nanotubos com a presença de nanocarga condutora e; o desenvolvimento de um equipamento (Bode Plotter) baseado na plataforma Arduino.

Essa proposta é considerada atual e contemporânea, visando fornecer oportunidades de aprendizados aos leitores tanto no campo acadêmico quanto no âmbito profissional. Além do que, essa obra busca incentivar a divulgação de novos trabalhos e resalta a importância dos pesquisadores em divulgar seus trabalhos por meio de plataformas confiáveis, como a Atena Editora.

Mariana Natale Fiorelli Fabiche.

CAPÍTULO 1	1
MANUFACTURA ESBELTA EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS PRODUCTIVOS	
Jorge Tomás Gutiérrez Villegas María Leticia Silva Ríos Armando Ernesto Valles Ramírez Edgar Omar Gutiérrez Villegas	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2012407031	
CAPÍTULO 2	12
QUALITY MANAGEMENT AND FAILURE ANALYSIS APPLIED TO ONSHORE WELLS	
Chaves, J. A. F. Silva, G. F. Oliveira, R.P.S.	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2012407032	
CAPÍTULO 3	26
PRODUCTION OF PLA/EE-g-GMA NANOCOMPOSITES REINFORCED WITH CARBON NANOTUBES FOR ANTISTATIC APPLICATION	
Carlos Bruno Barreto Luna Renate Maria Ramos Wellen Edcleide Maria Araújo	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2012407033	
CAPÍTULO 4	40
BODE PLOTTER – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO ELETRÔNICO AUXILIADO POR COMPUTADOR PARA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE SISTEMAS DINÂMICOS	
Erick H. L. dos Santos Rafael J. M. Santos Eric A. V. Prohmann Eliúde T. Moraes Almir S. e S. Neto [†]	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2012407034	
SOBRE A ORGANIZADORA	58
ÍNDICE REMISSIVO	59

MANUFACTURA ESBELTA EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS PRODUCTIVOS

Data de aceite: 01/03/2024

Jorge Tomás Gutiérrez Villegas.

Catedrático de Ingeniería Industrial en el Tecnológico Nacional de México campus Parral, Hidalgo del Parral, Chihuahua
<https://orcid.org/0000-0003-2902-6020>

María Leticia Silva Ríos

Catedrática de Ingeniería Industrial en el Tecnológico Nacional de México campus Parral, Hidalgo del Parral, Chihuahua
<https://orcid.org/0000-0002-4989-0185>

Armando Ernesto Valles Ramírez.
Catedrático de Ingeniería Industrial
en el Tecnológico Nacional de México
campus Parral, Hidalgo del Parral,
Chihuahua

Edgar Omar Gutiérrez Villegas

Catedrático de Ciencias Económico Administrativas en el Tecnológico Nacional de México campus Parral, Hidalgo del Parral, Chihuahua

inventario y utilización del espacio, así como incremento de la calidad, superando las expectativas del cliente, elementos que han constituido la esencia para alcanzar el éxito empresarial. La empresa donde se realizó el estudio implementó esta metodología para mejorar su proceso de producción. Después de un análisis exhaustivo de su línea de producción, identificaron áreas de desperdicio y oportunidades de mejora. La implementación de este sistema en la empresa generó una disminución considerable del nivel de inventarios, pasando de 408 a 0 mangas (reducción del 100% del nivel de inventarios de producto en proceso y producto terminado), trayendo como consecuencia una mejor utilización de los recursos financieros, materiales y humanos, liberando espacio en piso en área de producción de 538 pies² y almacenes 2200 pies², valores que representaron un 22% de disminución en espacio.

PALABRAS-CLAVE: Sistemas productivos, técnica de jalón, nivel de inventario, sistema de jalón, reducción de espacio, heijunka

RESUMEN: Manufactura esbelta es una filosofía revolucionaria utilizada por las empresas productoras de bienes de transformación con un enfoque en el aumento de la eficiencia y de reducción de desperdicio entre otros: tiempos de entrega, trabajos en proceso, nivel de

LEAN MANUFACTURING IN IMPROVEMENT OF PRODUCTION PROCESSES

ABSTRACT: Lean manufacturing is a revolutionary philosophy used by companies producing manufacturing goods with a focus on increasing efficiency and reducing waste among others: delivery times, work in process, inventory level and space utilization, as well as an increase in quality, exceeding customer expectations, elements that have been the essence of achieving business success. The company where the study was carried out implemented this methodology to improve its production process. After a thorough analysis of their production line, they identified areas of waste and opportunities for improvement. The implementation of this system in the company generated a considerable decrease in the level of inventories, going from 408 to 0 sleeves (100% reduction in the level of inventories of products in process and finished products), resulting in a better use of resources. financial, material and human, freeing up floor space in the production area of 538 ft² and warehouses of 2,200 ft², values that represented a 22% decrease in space.

KEYWORDS: Production systems, pull technique, inventory level, pull system, space reduction, heijunka

INTRODUCCIÓN

Un sistema de producción utiliza insumos en forma de materiales, personal, maquinaria, capital, servicios e información y los transforma dentro de un subsistema en los productos y/o servicios deseados. En los últimos años en la industria de transformación se han experimentado grandes cambios en la manera de desarrollar los procesos productivos, esto ha sido en gran parte a la marcada competencia y su deseo por permanecer en el mercado. Los principales promotores de dichos cambios son las empresas que trabajan con sistemas de manufactura esbelta y/o sistemas de clase mundial, entre los que se encuentran la técnica de jalón desarrollada por Toyota Motor Company.

Las empresas nacionales o multinacionales tienen como objetivos la reducción de costos y mejoramiento de productividad dentro de sus esquemas de producción, para permanecer competitivos en una economía donde los clientes cada día exigen más producto, mejor calidad, menores precios y entregas frecuentes y a tiempo. Otro objetivo que influye es la identificación de lo que no agrega valor al producto o dicho en otras palabras, la eliminación de todo aquello que genere costos para la empresa y por lo cual el cliente no está dispuesto a pagar. Para esto se debe crear un flujo continuo para que cada paso agregue valor a otro desde la materia prima hasta la concepción del producto final (Womack y Jones, 2003). Esto permite crear sistemas de producción más robustos puesto que se eliminan algunos o todos los desperdicios que se generan en los procesos y la inestabilidad que tienen, creando sistemas de entrega de materiales apropiados y mejora las distribuciones de planta, para aumentar la flexibilidad en los procesos. Esto se logra al tener un ambiente más controlado de lo que son las entradas y las salidas, además de que se cuentan con controles más estrictos, robustos y con menos margen de error para la programación de las operaciones (Licker y Womack, 1997).

Las empresas de corte tradicional, generalmente en aras de mantener niveles de eficiencia altos fabrican excedentes de demanda (sobreproducción) considerado como desperdicio y que genera niveles de inventario altos impactando negativamente el flujo de efectivo y la rentabilidad de las empresas. Este desperdicio puede incluir los materiales con los cuales se produce, el tiempo en el manejo, espacio de almacenaje, cargos por inventario, maquinaria, equipo, así como defectos mismos de la sobreproducción mayormente causada por el uso excesivo de los recursos tanto humanos así como en equipo (Tincher, 2002).

En las operaciones, los niveles altos de inventarios pueden esconder muchos otros problemas como de maquinaria, problemas de calidad, tiempos largos de transportes y entrega de proveedores, ausentismo, organización, limpieza, comunicación de los problemas a lo largo de las organizaciones, tanto con los proveedores así como con los clientes. Los sistemas de manejo de material que controlan el flujo de producción ayudan a reducir éstos niveles mencionados a uno óptimo (Davis, 1999). Inventario en los procesos productivos según Axsater, (2006) lo define como toda la materia prima, trabajo en proceso y en si a todo el bien terminado listo para embarcarse, representando uno de los activos más importantes para la empresa, debido a que el retorno sobre lo invertido en dichos inventarios representan uno de los recursos sobre los cuales se cimienta la empresa y la generación de ganancias y por consiguiente las ganancias de los dueños y accionistas.

DESARROLLO

Descripción del método

El objetivo de todas las empresas es ganar dinero ahora y en el futuro, la acumulación de inventario de trabajo en proceso y producto final merman las utilidades de la empresa ya que consumen capital de trabajo y generan costos de almacenamiento. La empresa se dedica a la fabricación de transmisores de poder (bandas) para el ramo industrial. El proceso de producción de la empresa motivo del estudio consiste en la construcción, forrado y vulcanizado de bandas industriales, fabricando tres productos diferentes (MT 260, MT 390 y MT 450), la fabricación de estos productos se realiza por mangas, siendo una manga el equivalente a doce productos terminados de cualquiera de los tres productos que fabrica. La secuencia del proceso productivo para cada uno de los productos así como sus respectivos tiempos expresados en minutos se muestra en la Figura 1.

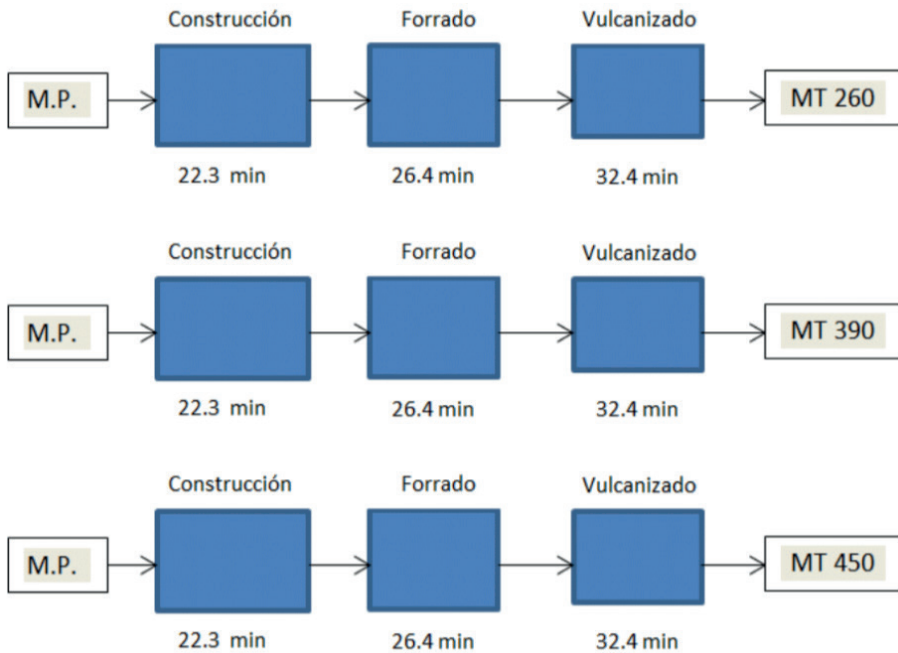


Figura 1. Diagrama de proceso de elaboración de productos

Fuente: Elaboración propia

Actualmente la empresa cuenta con 1,100 trabajadores en el área de manufactura entre técnicos y operadores, se trabajan 2 turnos de trabajo de 8 horas por día y 5 días laborales a la semana, Se presentan inventarios de producto en proceso y producto terminado en cantidades que elevan de manera considerable el nivel de inventario en algún producto en particular provocando en ocasiones paros productivos por falta de espacio y lo más grave por falta de materia prima en algunos productos que llevan a no entregar a tiempo productos terminados.

En la elaboración del producto se tiene inventarios en distintos puntos. El primer exceso de inventarios importante es en la entrada del proceso, ya que las partes provenientes del almacén de materia prima son puestos en un almacén temporal a la espera de ser repartidas en el área de construcción e iniciar el proceso de producción. Además, existen tiempos de espera considerables dentro del proceso, ya que, las partes que van de un área a otra son almacenadas en contenedores hasta ser movilizadas y ser repartidas entre los respectivos puestos de trabajo. La cantidad a almacenar no es estándar ni sigue un procedimiento establecido, este stock es mantenido hasta que la siguiente área de trabajo se encuentre habilitada para procesarlo. Así pues, la administración de inventarios presenta deficiencias, ya que mientras se mantienen niveles de inventario altos en algún producto, en otro se presentan faltantes en momentos específicos de tiempo que requieren entrega de productos, además de artículos defectuosos que pasan a ser reprocesados en el mejor

de los casos y cuando no es posible, simplemente se convierten en scrap. La empresa, por tal motivo trata de mantener niveles de inventario de los tres productos para evitar faltantes en la entrega al cliente.

Se realizó una recolección de datos de los niveles de producción mensuales de cada producto y el inventario final generado en el último mes, los datos recolectados se muestran en la Tabla 1. La producción final mensual en las diferentes áreas de producción, se muestran en la Tabla 2. La Tabla 3 indica el nivel de inventario final encontrado en las diferentes áreas.

PRODUCTO	PRODUCCION MENSUAL	INVENTARIO FINAL
MT 260	252	12
MT 390	148	8
MT 450	188	8

Tabla 1. Producción e inventario final mensual de producto terminado (mangas)

Fuente: Elaboración propia

PRODUCTO	CONSTRUCCION	FORRADO	VULCANIZADO
MT 260	368	308	252
MT 390	228	180	148
MT 450	372	232	188

Tabla 2. Producción final mensual por áreas (mangas)

Fuente: Elaboración propia

PRODUCTO	CONSTRUCCION	FORRADO	VULCANIZADO
MT 260	60	56	12
MT 390	48	32	8
MT 450	140	44	8

Tabla 3. Niveles de inventario final en las áreas involucradas (mangas)

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar la cantidad de inventarios tanto en proceso como de producto terminado que genera la empresa, esta situación es el principal problema que se tiene en el área de producción, ya que provoca otros problemas como son inventarios de un producto en particular en momentos determinados de tiempo por sobreproducción y faltantes de otros artículos, lo que evidencia que la organización requiere una mejor planificación de inventarios. Para ello se ha elaborado un plan de la producción de los productos faltantes. Una vez que los productos en inventario han sido agotados se procedió a implementar una mejora del sistema.

La idea de mejoramiento surge por la gran necesidad de entregar a tiempo los pedidos a los clientes y bajar el nivel de inventario. Las estrategias utilizadas fueron: Efectuar una programación nivelada de la producción que sirve de base para tener disponibilidad de producto terminado de manera más frecuente incrementando el nivel de entregas mediante la utilización de lotes de producción de tamaño de 5 mangas, la utilización del Sistema de Jalón para eliminar y controlar los niveles de inventario, así como cargas de trabajo equivalentes. La demanda semanal ajustada solicitada por el cliente se presenta en la Tabla 4.

PRODUCTO	DEMANDASEMANAL
MT 260	60
MT 390	35
MT 450	45

Tabla 4. Demanda Semanal (mangas)

Fuente: Elaboración propia

La nivelación de la producción total intenta regular un desequilibrio, haciendo que los volúmenes de producción sean lo más constantes posibles. En este sentido, si se considera la producción de una gama de artículos diferentes, para empezar se debe preparar una secuencia de lotes de producción semanal, a partir de los pronósticos y los pedidos en firme. El nivelado de la producción consiste en determinar el volumen diario de producción, de forma tal que se mantenga lo más constante posible. Este volumen diario es un aproximado de las cantidades exactas a producir, además es una guía para prevenir a los responsables de las estaciones de trabajo y almacén las posibles necesidades en un futuro próximo.

La nivelación de la producción con un tamaño de lote de 5 mangas da una secuencia de programación de 12 lotes del producto MT 260, 7 lotes del producto MT 390 y 9 lotes para el producto MT 450. Una posible secuencia de la programación es **MT 450 MT 260 MT 390 MT 450 MT 260 MT 390 MT 260 MT 450 MT 260 MT 450 MT 260 MT 390 MT 450 MT 260 MT 390 MT 260 MT 450 MT 260 MT 450 MT 260 MT 390 MT 450 MT 260 MT 390 MT 260 MT 450 MT 260 MT 390** que fue la utilizada en las corridas de producción semanal. Rother y Jones (1999) mencionan, lo que se busca al aplicar la manufactura esbelta es tener un proceso que sea capaz de fabricar lo que el siguiente proceso requiere y en el momento que lo requiere. Se busca ligar todos los procesos de la empresa identificando las necesidades desde el consumidor final hasta la preparación de la materia prima en flujo continuo, lo cual ayuda a reducir tiempos de entrega y costos y a aumentar la calidad del producto. Considerando que el tiempo marcapasos del sistema corresponde en los tres productos a la operación de vulcanizado, situación que establece que el tiempo pitch

(tiempo de lanzamiento de cada lote) corresponde a 162 minutos, es decir una producción de 5 mangas (60 artículos de cada producto) en 162 minutos, lo que significó una utilización de 4536 minutos de los 4800 disponibles en la semana para producir los 28 lotes. Esto indica que el proceso si tiene capacidad para producir la demanda solicitada por el cliente.

La reducción de inventarios se logra aplicando la técnica de jalón. Una vez que se han establecido los recursos necesarios para producir las cantidades que indica el nivelado de la producción, se debe establecer la programación exacta, esta solo se entrega a las estaciones de construcción (al inicio de la línea), y desde allí, mediante la utilización de un sistema de señales, se desencadena el proceso de producción de los productos entre dos estaciones de trabajo consecutivos o bien considerando la línea como proveedor y relacionándolo con el cliente (demanda). En los sistemas de producción de jalón se utilizan tarjetas que son incorporadas a los contenedores de material. El consumo de tales contenedores libera la tarjeta kanban, que actúa como orden de reposición para el proceso precedente. La reposición de contenedores se debe realizar considerando la Ecuación 1, que es la fórmula que utiliza el sistema kanban.

$$TA = \frac{\#K * TC}{DD} = \frac{1 * 5}{140} = .035714 \text{ semanas} = 162 \text{ minutos}$$

Ecuación 1. Calculo de tiempo de reposición del contenedor

Dónde:

TA= Tiempo de abastecimiento (semanas)

#K= Número de contenedores o tarjetas a utilizar

TC= Tamaño del contenedor

DD= Demanda semanal

En la Ecuación 1 se consideró un tamaño de contenedor de 5, una sola tarjeta que es el equivalente a un contenedor, la demanda semanal total de los productos (140 unidades) y una jornada de trabajo semanal equivalente al tiempo requerido para producción de 4536 minutos. La implementación del sistema se llevó a cabo mediante la realización de una Programación Heijunka, dicha programación se muestra en la Tabla 5.

# LOTE	TIPO	TIEMPO PITCH	TIEMPO INICIO	TIEMPO FINAL	# LOTE	TIPO	TIEMPO PITCH	TIEMPO INICIO	TIEMPO FINAL
1	MT 450	162	0	162	15	MT 390	162	2268	2430
2	MT 260	162	162	324	16	MT 260	162	2430	2592
3	MT 390	162	324	486	17	MT 450	162	2592	2754
4	MT 450	162	486	648	18	MT 260	162	2754	2916
5	MT 260	162	648	810	19	MT 450	162	2916	3078
6	MT 390	162	810	972	20	MT 260	162	3078	3240
7	MT 260	162	972	1134	21	MT 390	162	3240	3402
8	MT 450	162	1134	1296	22	MT 450	162	3402	3564
9	MT 260	162	1296	1458	23	MT 260	162	3564	3726
10	MT 450	162	1458	1620	24	MT 390	162	3726	3888
11	MT 260	162	1620	1782	25	MT 260	162	3888	4050
12	MT 390	162	1782	1944	26	MT 450	162	4050	4212
13	MT 450	162	1944	2106	27	MT 260	162	4212	4374
14	MT 260	162	2106	2268	28	MT 390	162	4374	4536

Tabla 5. Programación Heijunka

Fuente: Elaboración propia

Una característica del sistema productivo es que se obligan a los suministradores de materias primas y componentes a programas con entregas muy exigentes, en donde se debe entregar materia prima y componentes para la elaboración de los productos cada 162 minutos. Este tipo de programación es flexible ya que exige de los proveedores entregas frecuentes y en pequeñas cantidades, en este caso para 5 mangas (60 productos) de acuerdo a la secuenciación marcada en la Programación Heijunka. Para que se puedan cumplir estos programas, con varias entregas diarias, es necesario que los suministradores de materiales y componentes sean considerados como parte del sistema de producción y que se establezca un trato de cooperación que permita entregas de calidad y sin retrasos. Debido a ello, la calidad concertada entre el fabricante y los proveedores es una práctica muy difundida en los sistemas de producción JIT (Justo a Tiempo). Este lanzamiento de productos en los tiempos programados elimina de manera dramática los niveles de inventario de producto en proceso y producto terminado.

COMENTARIOS FINALES

Resumen de resultados

Los resultados obtenidos con la implementación de la técnica de jalón en la empresa, cumplen con los objetivos marcados. La Tabla 6 indica la cantidad de mangas producidas de cada uno de los productos, así como su inventario final; La Tabla 7 muestra la producción final de mangas de cada artículo en las diferentes áreas del proceso productivo; La Tabla 8 señala los niveles de inventario de producto en proceso por áreas.

PRODUCTO	PRODUCCION MENSUAL	INVENTARIO FINAL
MT 260	240	0
MT 390	140	0
MT 450	180	0

Tabla 6. Producción mensual e inventario final de producto terminado

Fuente: Elaboración propia

PRODUCTO	CONSTRUCCION	FORRADO	VULCANIZADO
MT 260	240	240	240
MT 390	140	140	140
MT 450	180	180	180

Tabla 7. Producción final mensual

Fuente: Elaboración propia

PRODUCTO	CONSTRUCCION	FORRADO	VULCANIZADO
MT 260	0	0	0
MT 390	0	0	0
MT 450	0	0	0

Tabla 8. Niveles de inventario de producto en proceso por áreas

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Cualquier actividad que no agregue valor al producto final es considerada como un desperdicio, tomando en cuenta que todo proceso debe fluir constantemente para que agregue valor a otro. Las principales mejoras se aprecian en la eliminación de los inventarios de manera total (28 mangas de producto terminado y 380 mangas de producto en proceso), una disminución en el tiempo laboral de 5.5% equivalente a 264 minutos en la semana aprovechados en otros proyectos por la empresa.

La eliminación de inventarios produjo ahorros en espacio de 538 pies² en área de producción y 2,200 pies² en área de almacenes. La Figura 2 muestra una comparación entre la situación anterior con la situación actual respecto a los niveles de producción por áreas, mientras que la Figura 3 indica la comparación de los niveles de inventario de los productos en proceso antes y después de aplicar la técnica de jalón en las diferentes áreas de producción de la empresa.

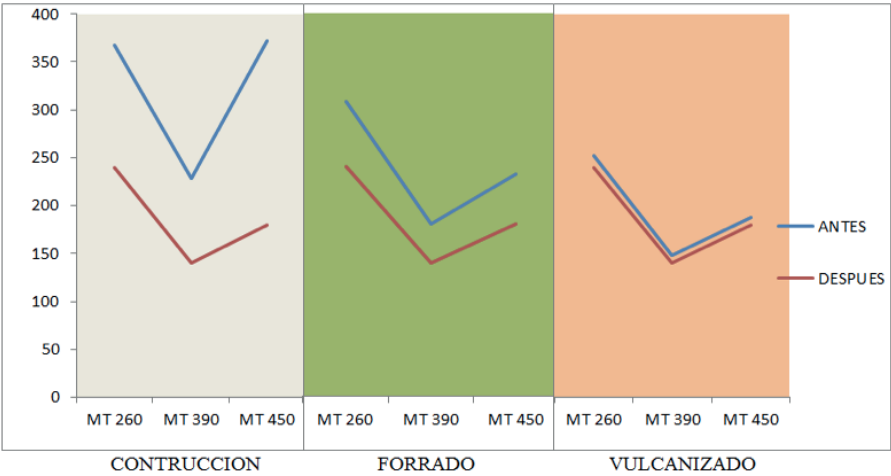


Figura 2. Comparación de niveles de producción

Fuente: Elaboración propia

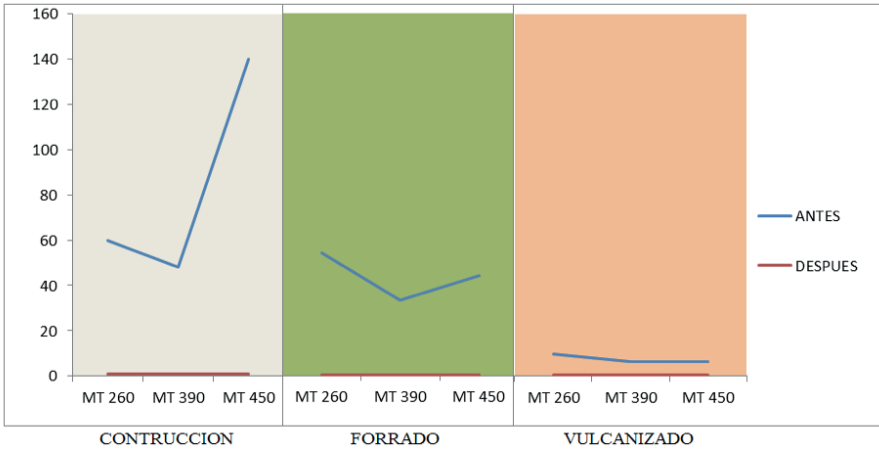


Figura 3. Comparación de niveles de inventario de producto en proceso y terminado

Fuente: Elaboración propia

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar futuras investigaciones donde se involucren más áreas de la empresa y se realicen pruebas estadísticas de correlación. De ésta forma se puede analizar y en su caso comprobar el impacto que tiene en las diferentes áreas la utilización de la técnica de jalón. Además de relacionar dichos resultados para definir, cuáles áreas son las que se ven más impactadas positivamente con dicha técnica. Se recomienda también, que se utilice la técnica para áreas similares, de empresas con giros diferentes, para analizar la relación entre las áreas de mejora y poder comprobar, si el tipo de producto afecta de una manera significativa a los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

Axsater, S. (2006). ***Inventory control***. Springer Verlag New York.

Davis, J . (1999). ***Fast Track to Waste-Free Manufacturing : Straight Talk from a Plant Manager***. Taylor and Francis, Inc..

Liker, F., Womack, J . (1997) ***Becoming lean: Inside Stories of U.S. Manufacturers***. Productivity Press Inc..

Rother, M., & Jones, D. (1999). ***Learning to see: Value stream mapping to create value and eliminate muda***. Massachusetts: Brookline.

Tincher, M. (2002). ***High Velocity Manufacturing : A Step-by-Step Approach to Make Lean and Agile Manufacturing a Reality***. Baker Inc.

Womack, J. , Jones, D. (2003). ***Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation***. Simon & Schuster Adult Publishing Group.

QUALITY MANAGEMENT AND FAILURE ANALYSIS APPLIED TO ONSHORE WELLS

Data de aceite: 01/03/2024

Chaves, J. A. F.

Federal University of Sergipe, Department
of Chemical Engineering, Sergipe - SE,
Brazil

Silva, G. F.

Federal University of Sergipe, Department
of Chemical Engineering, Sergipe - SE,
Brazil

Oliveira, R.P.S.

Federal University of Sergipe, Department
of Chemical Engineering, Sergipe - SE,
Brazil

ABSTRACT: Onshore oil wells are active that deserve attention to their failures, as this generates production loss to the return of the well and equipment repair costs and probe intervention to reestablish the well-equiping system. Therefore, proposing measures to extend the life of the wells of wells and reduce the time of the standing well awaiting intervention are important to improve the financial result of the concessions. This work shows how quality management tools (histogram, Ishikawa and Pareto) and fault analysis (causes and effects) were applied to the equipment that brought wells the failure between 2014 to

2018, in the Sergipe terrestrial fields and that Measures have been taken to improve the MTBF (Mean Time Between Failures) of the wells in order to improve the economic result of the concessions. With this study it was concluded that the use of production column coating technology and the use of pumps suitable for the corrosive environment was essential for reducing the number of wells failure and that with the application of quality management tools It has a better view of the information to monitor the failures.

KEYWORDS: Onshore Wells, Quality Management, Failure Analysis.

INTRODUCTION

Onshore oil production is predominant in the world scenario and therefore studying ways to increase its efficiency becomes important to companies in the sector. Thus, it is interesting to conduct studies on improving the performance of lifting systems, as it is the elements that have a high cost to replacement when failure and greater technical complexity for those who perform their projects in land units during the life of the facilities in the life phase of production, Chaves (2018).

In order to improve the life of the equipment used to raise fluids in the wells, it is necessary to apply failure analysis concepts, maintenance and reliability until a level of operating time compatible with the expected one reaches for each Method of elevation according to the literature of the sector, Dantas et al. (2009). Sergipe and Alagoas Business Unit (Un-Seal) of Petrobras used these concepts and created a quality management system for failure analysis and increased time between wells from a computerized computer system with management tools maintenance and best practices of the international industry.

The main artificial elevation methods used in the world today are the mechanical pump (BM), the Progressive Cavities Pump (BCP), the Submersed Centrifugal Pump (BCS) and Gas-Lift, Bastos (2017) and Chaves (2018). These methods are endowed with moving parts and components that wear out as a function of use, operating conditions and operating time. Therefore, it is important to make the correct use of each item descended in the compositions used by the wells in order to extend the life of the scheme as a whole and thus obtain a lower cost with well maintenance, be this cost related to acquisition and replacement of equipment or the cost of intervention with probe, Rodrigues and Da Silva (2005).

Petrobras operates some producing fields in the state of Sergipe from Un-seal, and the fluids produced are medium or heavy oil, with BSW most of over 90% and Gas-Oleum ratio (RGO) in the range of 50 SM³/m³. The fluids produced contain high H₂S contents in the gaseous fraction, sometimes reaching 5000 ppmv, and CO₂ with contents of up to 30% and with a water produced with high salinity where some cases reaches 300,000 ppm of salts (chlorides). These characteristics lead to a high number of failures in producing wells and consequently the cost of maintenance increases, where from 2014 to 2018 about 7568 probe interventions to correct failures and reestablish production in wells.

In order to reduce the number of wells in wells or increase the time between them and based on the study with the fault analysis management system is that Petrobras has developed a production column coating technology that made a significant reduction enabled of fault in wells that suffered from corrosion or friction on the walls of the pipes and thus drilled prematurely. In addition, the study provided the identification of the need to use background pumps with shirts that have greater corrosion resistance and this was made the acquisition and use of brass -made shirts in certain mechanical pump wells.

Thus, this work has as research problem presenting how the quality management methodology for fault analysis in terrestrial wells applied by the team, which maintenance and reliability management elements are applied in order to propose the use of technologies that increase the Average time between failures (MTBF), reduce the average repair time (MTTR - Mean Time to Repair) and which technologies were successful in reducing probe interventions and increased time between failures Petrobras' terrestrial concessions in Sergipe.

DEVELOPMENT

Theoretical Reference

Since there are several ways to rise oil, the mechanical pump is “the most used artificial elevation method in terms of number of facilities worldwide. It is estimated that 90% use the mechanical pumping system to increase well production ”(BASTOS, 2017), being in Petrobras onshore this proportion and therefore stands out the importance of studying this method in relation to others and its Main components that are the background pump, pump rods and subsurface pipes.

Increasing the useful life of wells lifting schemes is a common goal in the sector's literature, because “motivation owes the large number of intervention in wells due to the presence of structural failures, corrosion, assembly, etc.” (Rodrigues & da Silva, 2005) and McIntosh et al. (2020) talks about the importance of studies of reliability and maintenance management as ways to increase time between failures, visions that corroborate what is proposed here.

About reliability and maintenance management are several tools that can be used for the purpose of this work. Dantas et al. (2009) comments that “the reliability of equipment or industrial product is the likelihood that it successfully performs its functions, under a specific period of time, without a stop for maintenance or failure”, being this concept important for Wells, because it is the sources of revenue from oil companies, already in relation to maintenance management we can highlight the use of quality management tools: flowchart, panser, Ishikawa diagram, check sheet, histograms, dispersion and letters Control as ways to enable the analysis, perdoná, naimer, soto and goday (2016).

Total quality tools are used to depend on the type of case under analysis, the most frequent in maintenance management for fault analysis the pareat diagram, Ishikawa diagram and the histogram. According to Perdoná et al. (2016) The Pareto Diagram aims to show the items under analysis due to its importance and proportion to the sample as a whole, while the Ishikawa diagram explores and indicates the possible causes of a condition or problem occurring and with This can be used to propose measures to reduce or eliminate the occurrence and the histogram is widely used to show data distribution through a bar chart that indicates how many times a certain fact occurs or repeats. With these tools it is possible to visualize how is the situation of a particular problem under analysis so that it is possible to propose improvement measures.

Methodology

In the present study, an exploratory, quantitative and deductive methodology applied, from a case study with multiple sources of evidence, was used. Of the 6 sources of evidence described in the work of Yin (2014), which are: documentation, file records, interviews, direct observation, participant observation and physical artifacts. In this study, documents, file records and direct observation were used as sources of evidence. How documents were used to evaluate wells evaluation in the company's computerized systems, such as file registration, the historical fault and production of wells and direct observations were made when evaluating equipment conditions directly in maintenance workshops and probe inspection.

The research issues that conducted this work are the ones presented below:

- Which components and factors contribute to failure in elevation schemes in the studied concessions?
- What actions should be performed to reduce the number of fault in wells?
- What is the impact of the changes proposed on the process and the company studied?

It is noteworthy that the above information is only possible to observe because of the Petrobras Wells Management System (Info) and the Quality Management Methodology for Failure Analysis in wells. Below is an illustrative flowchart with the procedure used today by the company:

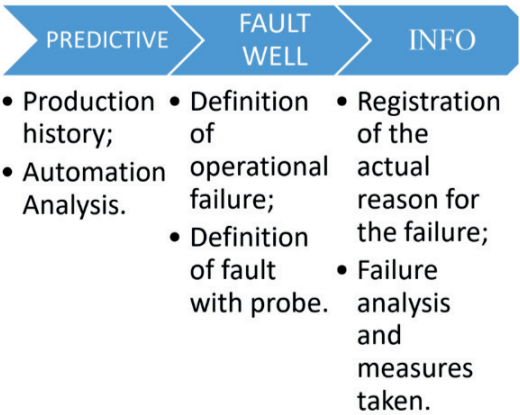


Figure 1. Fault management phases in wells.

Given the quantitative character of the study, the research begins with the survey of historical data to analyze the factors that lead to the fault in wells, with this information being taken from the company's wells management system. For this they were elaborated histograms and diagrams of faults that occurred for reasons and components and with this identified the elements that must be prioritized in the analysis for change.

Then was elaborated Ishikawa diagrams to observe the causes and reasons of failures so that it was possible to propose MTBF improvement actions. At this point, the detailed analysis of the fault modes made from reports prepared by the Petrobras lifting equipment workshops was essential.

In the end, it was analyzed the gains with the changes made and what impacts caused in the concessions studied and how this can be interpreted from financial information, and histograms.

As a limitation we have that the results and analysis focused on the mechanical pump lifting method, as it has greater relevance compared to the total number of failures and thus making it possible to display more detailed information from the results obtained. See below figure 2 which features total methodogram and pizza graph failure failures for the years 2014 to 2019.

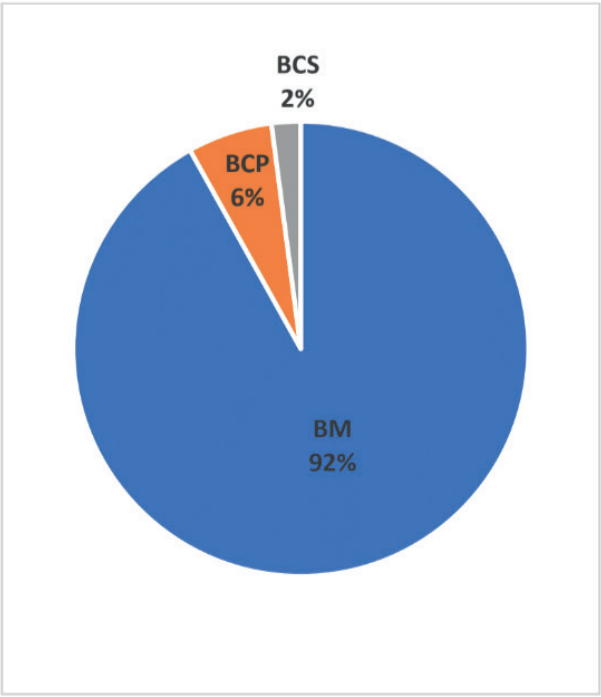


Figure 2 - Representativeness of the Elevation Method by total failures from 2014 to 2019.

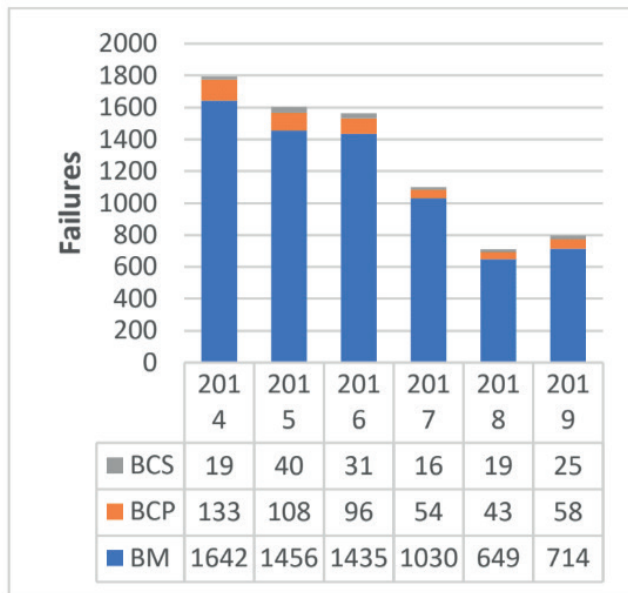


Figure 3 - Number of interventions by elevation method.

RESULTS

The well operating team performs in its routine the verification of production flows by well and measured values of current, pressure, tension, loads, among other parameters depending on the type of pit elevation scheme under analysis. With this, a predictive analysis of the operating condition of the well is performed and appropriate measures when identified deviations. When the failure occurs first an assessment of the well is made by the operating team with surface techniques and then an initial diagnosis of the fault that follows with an intervention with a probe for equipment replacement and verification of the actual cause of failure. Until this step is collected information and it is from this that the info system failure module is fed so that the analysis of mode and failure to propose improvements to future equipment schemes can be done.

The Info system consists of three modules: production, workshop and toyfish. The Workshop Module is responsible for storing failure information in pumps and complements such as filters and seals, the Module Disagreeing stores failure information in tubes and stems and the production module consolidates the information necessary to comply with the quality management method to the Consolidate the production, operation, probe, workshop and disyncination information with analysis of the area engineer analysis and with all the consolidated history. The Workshop and Drive Modules are configured with the taxonomy of equipment to allow the integration of diagnostic, mode and cause data according to FMEA technique. Below is the figure 4 which shows how the FMEA applies to the procedure performed by Petrobras.

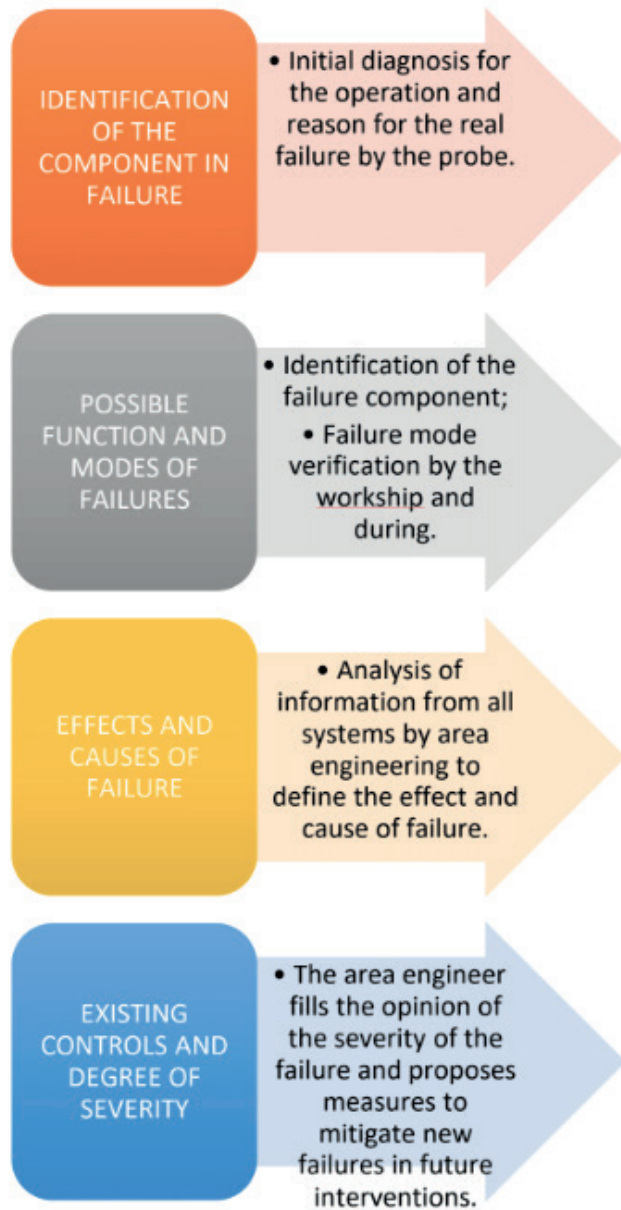


Figure 4 - FMEA Applied to Fault Management in Wells.

It is noteworthy that the consolidated information of the FMEA is stored in the Info Production System and is for historical analysis of the process of fault analysis in wells. Note that without a system thus designed with maintenance and reliability management tools it is not possible to comply with research issues, as the information would not be available for it. See below Figure 1 which is a cut-off system screen cut for a well with the fault analysis already performed by the area engineering.

Data Início	Data Fim	Nº	Sonda	Diagnóstico Intervenção Infoçoço	Tipo Oper.	Conf.	Análise de Falha			
							Equipamento	Componente	Modo/Funcionalidade	Causa
01/02/2022	03/02/2022	12	SEM	Haste: Haste	Limpeza/Óleo ou Gás	N4LX	HASTE CURTA	LUIVA DE	ESPANADO	INSTALAÇÃO
23/07/2021	26/07/2021	11	SEM	Haste: Haste Partida	Limpeza/Óleo ou Gás	N4LX	HASTE DE BOMBEIO	CORPO	PARTIDO	FLUIDO CORROSIVO
14/07/2017	16/07/2017	10	SPT-34	Bomba de BM: Pistão	Limpeza/Óleo ou Gás	AP9E	HASTE DO PISTÃO	CORPO	APRISIONADO	BAUXITA
06/12/2016	07/12/2016	9	SPT-59	Coluna: Furada	Limpeza/Óleo ou Gás	BEDW	TUBO	CORPO	FURADO	FLUIDO CORROSIVO
21/06/2016	22/06/2016	8	SPT-130	Haste: Haste Partida	Limpeza/Óleo ou Gás	B5P1	HASTE DE BOMBEIO	CORPO	PARTIDO	FLUIDO CORROSIVO
04/11/2015	06/11/2015	7	SPT-55	Coluna: Furada	Limpeza/Óleo ou Gás	KB1W	TUBO	CORPO	FURADO	FLUIDO CORROSIVO

Figure 5 - History of CP-1764-SE-U.

Observação Especial: [05/2017]: Efetuado recanhoneio dos intervalos compreendidos entre 595 e 610,5 m. Realizado TCF entre as zonas. Realizado RP-01 das zonas RIA / TOR + MUR/OTT topo + MUR/OTT base (595,0 - 658,0 m), em conjunto: PFe= 52,63 kgf/cm² e Temp=46,50C. Efetuado tratamento hidráulico-ácido L2 das zonas RIA/TOR + MUR/OTT topo (595,0 - 610,5 m), em conjunto. A diferença da checagem do fundo com raspador a 651,7 m e lava dentada a 659,3 m confirma provável restrição a 651,7 m. [01/2015]: Restauração/Acidificação(jateamento ácido). Cortado cimento até 662 m. Carbonateados os intervalos: 626,5/627,5m - 2 Picos, 631,5/632,5m; 650,5/652,0m e 656,0/658,0m. Acidificados os intervalos(jateamento ácido): 595,0/610,5m e 626,5/658,0m.	Ação Bloqueadora: Instalar filtro de areia, colocar bomba acima dos carbonateados e substituir coluna de tubos por coluna revestida na próxima intervenção. Avaliar o uso de anticorrosivo de forma contínua. Avaliar substituição do grau da haste de bombeio.	Observação: 100% DAS HASTES DE 3/4" SAIBAM COM PARAFINA NO CORPO. 100% DAS HASTES DE 5/8" SAIBAM COM SCALE E CORROSÃO NO CORPO. A ÚLTIMA HASTE SAIU COM ABRASÃO NO CORPO. EFETUADO TESTE COM A BOMBA NA SUPERFÍCIE COM 800 PSI NEGATIVO, PORÉM IDENTIFICADO PROBLEMA DE BOMBA SIGAME: bomba sucateada.
---	---	---

Figure 6 - Data from the CP-1107-SE-U

Note the increase in campaign time between interventions after installation of the coated column on 07/16/2017. The well stopped having interventions by hole in the column and started to have interventions on broken rods, but with a much longer campaign time. See by the example above that with this system it is possible to observe the history of the Summary Table Failure Analysis and clicked on any of the lines it is possible to check the comments of the engineer who analyzed the failure and thus check the measurements and information which were identified as important. Now see Figure 6 below the comments when clicking on the intervention of probe number 12 of the CP-1107 well, which suffered from background pump problems so bass MTBF and that after the comments made by the engineer started to have his mechanical scheme changed and With this your background pump MTBF has significantly improved.

Note that the engineer makes an analysis of the components with information from all systems and gives the opinion on the actual reason for the failure and what measures should be taken so that no further failures occur.

With the history generated by this system it is possible to meet the first research question that is to define which components and factors contribute to the failure in lifting schemes from the concessions studied from the exposure of the 2014 failure causes of the subsurface components of subsurface of BM is presented in the form of Pareto diagrams as can be seen in figure 7, 8 and 9 below.

It can be seen that corrosion and abrasion are the main reasons for failure and therefore the Ishikawa diagram for these problems as shown in Figures 10, 11 and 12 was made.

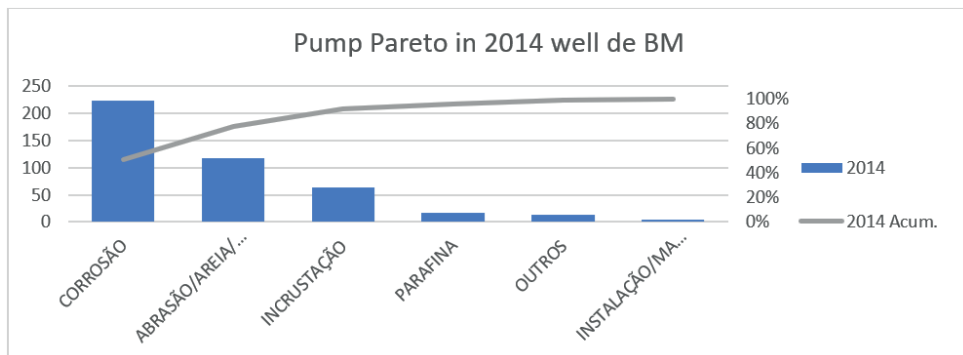


Figure 7 - Pareto diagram of the causes of background bombs in BM wells in 2014.

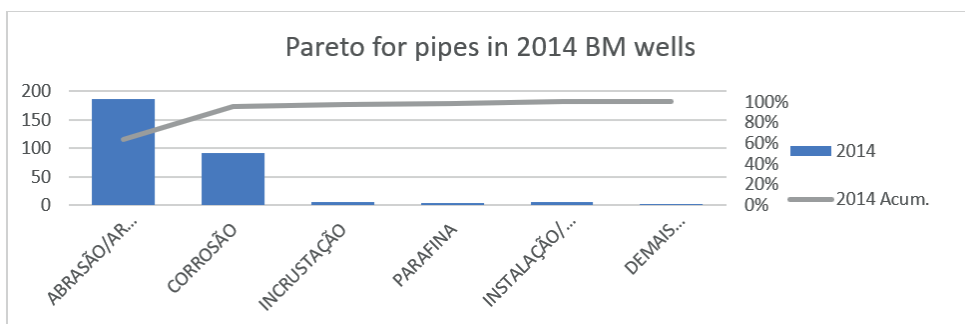


Figure 8 - Pareto diagram of pipe failure causes in BM wells in 2014.

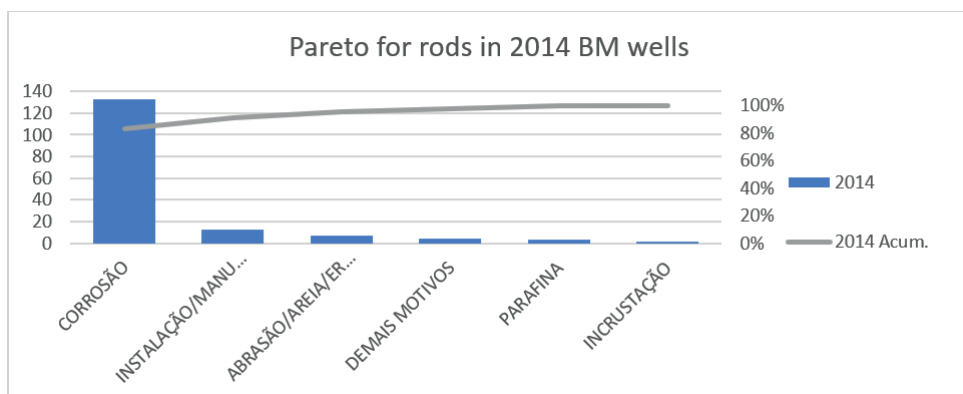


Figure 9 - Pareto diagram of fault causes in rod in BM wells in 2014.



Figure 10 - Ishikawa diagram for corrosion pump failure.



Figure 11 - Ishikawa diagram for abrasion pipe failure.

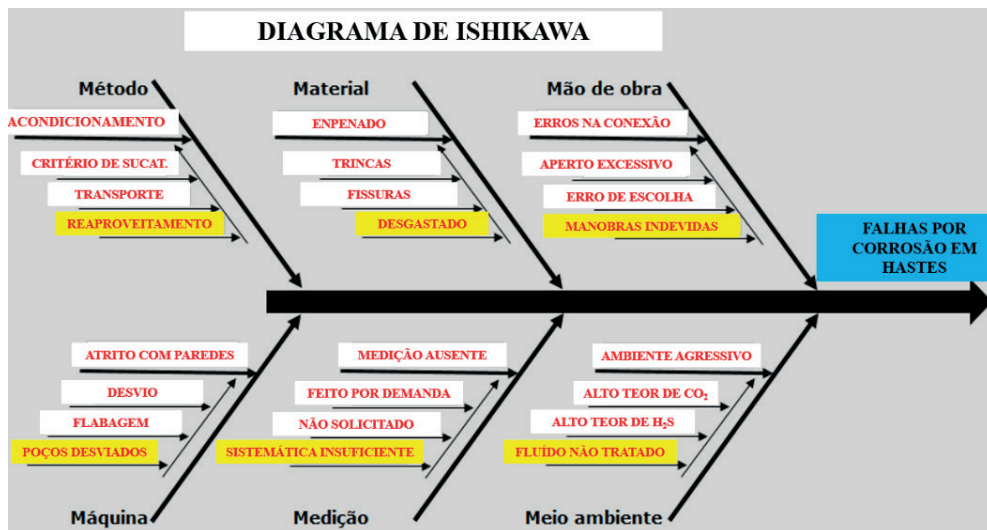


Figure 12 - Ishikawa diagram for rod failure by corrosion.

See that with the elaborate diagrams it is easy to notice the roots of fault motifs and thereby proposing improvement actions. It was based on this that the team of engineers of the production of Petrobras Sergipe proposed as improvement measures the installation of columns coated with polyethylene and polyamide to reduce the number of failures in corrosion production pipes, the use of pumps with Brass Shirt and a set of components suitable for corrosive environment to reduce bottom bombs failures and the proposal to use noblest metallurgies pump rods to reduce pump stem faults, as well as several other measures for resolution of the Problems encountered in the Ishikawas, elucidating the second research question.

From 2014 to 2018 substantially applied to corrosion adapted pump technologies and columns coated as explained above, but it was not possible to apply rods with new technologies. With this, the results below were obtained, as seen in Figures 13, 14 and 15. 2019 did not enter the analysis because it did not have all the analyzes filled when elaborating the study.

From histograms we can see a significant reduction in the number of failures in production columns and background pumps as expected for the changes made in the schemes. The rods got the same failure profile and it is interesting to note that the main mode of failure was the party. With the values below and with the natural trend of lifting the number of failures by scrapping the material used, we can propose conservatively that there was a reduction in the number of failures in the following years compared to the base year 2014 of about 1000 interventions with Probe per year, where as an intervention costs an average of U\$ 26,800, we can say that the changes generated an savings of up to U\$ 26,8 million per year for the company only with cost reduction, but it is worth noting that there is production gain associated with the execution of less failure and higher MTBR.

It is important to emphasize that the number of wells already drilled in the Petrobras unit under analysis exceeds 3,000 units, but due to feasibility and strategy in 2014 we had about 1500 wells in operation and that in 2018 we had 1200 wells in operation, thus representing An average MTBF of 10 months in 2014 and 18 months in 2018, being considered the MTBF relating to only interventions with probe, not being considered those of crane.

CONCLUSIONS

Based on the results found we can see that the research questions were answered, as the quality management of wells was applied, the fault historicals were analyzed, then the Ishikawa of the main reasons for failure and at the end of the reduction were elaborated. In the number of fault by histograms with the financial results achieved that are important to validate the study. As can be seen, polyethylene and polyamide -covered spine technologies and corrosive environments pumps were successive in significant reduction in the number of faults in wells and showing the importance of adopting this practice by oil and bus companies. As a suggestion for future work we have to improve the technology used in pump rods and make more research on other failed reasons not listed in the analysis.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thank CAPES, CNPq, PETROBRAS, FAPITEC and UFS for the scholarships.

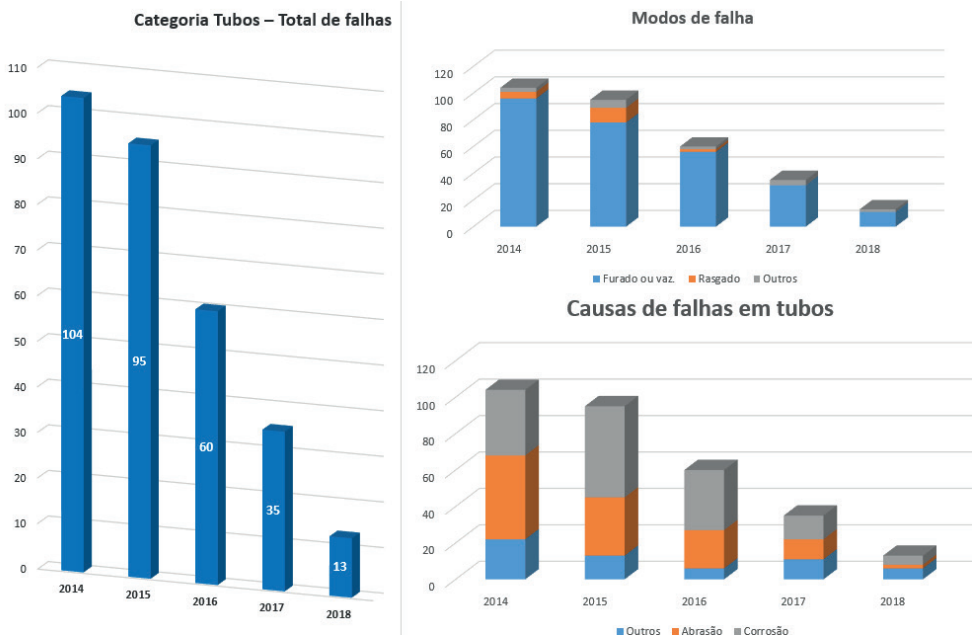


Figure 13 - Situation of pipe failures as a function of time.

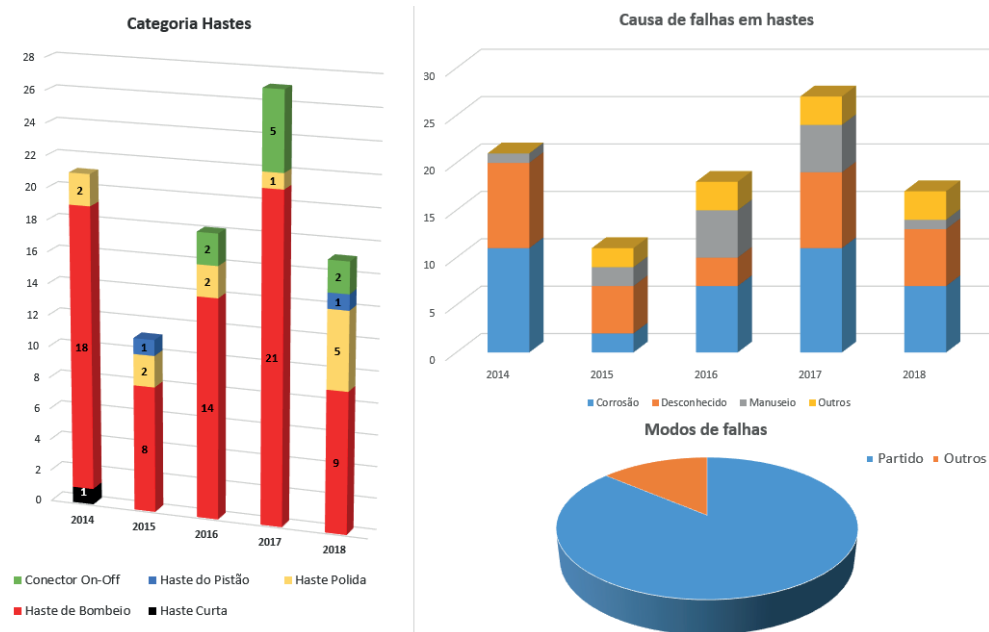


Figure 14 - Situation of rod failures as a function of time.

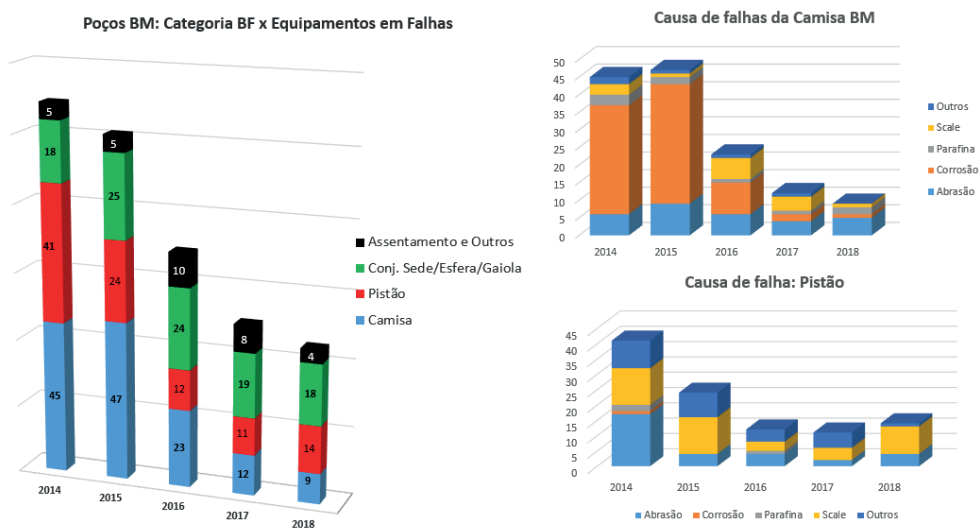


Figure 15 - Situation of bombs failure as a function of time.

REFERENCES

- BARBOSA, C. (1990). **O projeto de pesquisa**. Portaideia. https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=BARBOSA%2C+C.+O+projeto+de+pesquisa.+1990.&btnG=
- BASTOS, I. C. (2017, February 17). EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ELEVAÇÃO ARTIFICIAL – **BOMBEIO MECÂNICO**. *HOLOS*, 1(2017), 255–263. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.5194>
- Chaves, J. A. F. (2018). **FERRAMENTAS DE GESTÃO ESTRATÉGICA PARA APLICAÇÃO DE NORMAS REGULAMENTADORAS DO TRABALHO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS ONSHORE** [TCC, Universidade Federal de Sergipe]. https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/10487/2/Jose_Andersands_Flauzino_Chaves.pdf
- Dantas, M.A, Valença, D. M., Freire, M. P. da S., De Medeiros, P. G., Da Silva, D. N., & Aloise, D. J. (2009, June 28). **Modelo de regressão Weibull para estudar dados de falha de equipamentos de sub-superfície em poços petrolíferos**. *Scielo Brasil*. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132010005000010>
- Garrido, R. L. F. (2017). **CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO: UM ESTUDO SOBRE A TECNICA DA FMEA** [TCC, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. <http://www.repositorio.polli.ufrj.br/monografias/monopoli10022656.pdf>
- LAFRAIA, J. R. B. (n.d.). **MANUAL DE CONFIABILIDADE, MANTENABILIDADE E DISPONIBILIDADE**. Qualitymark Editora Ltda. Retrieved February 9, 2022, from Qualitymark Editora Ltda
- MANÇÚ, J. S. (2013). **APLICAÇÃO DE FERRAMENTA E MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHA NA INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE BOMBEIO CENTRÍFUGO SUBMERSO (BCS)** [Dissertação, FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC]. <http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/handle/fieb/172>
- McIntosh, S. G. J., McIntosh, G, Lumbye, P, Nielsen, H. H., Patterson, S, & Lutzen, P. (2020). **Development and Practical Application of an Analytical Well Failure Model that Improves Well Safety and Production Efficiency**. Society of Petroleum Engineers. <https://onepetro.org/SPEBERG/proceedings/20BERG/2-20BERG/D021S009R001/448650>
- PERDONÁ, I. I., NAIMER, S. C., SOUTO, A. J. P., & GODOY, L. P. (2016, March 22). Associação entre Ferramentas da Qualidade e Tipos de Manutenção: **Análise e Aplicabilidade em uma Unidade Militar**. *Revista Espacios*, 37(14), 14–16. <https://www.revistaespacios.com/a16v37n14/16371414.html>
- Rodrigues, M. C., & Da Silva, J. F. (2005). **ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE HASTES DE BOMBEIO POR CAVIDADE PROGRESSIVA (BCP) PARA POÇOS TERRESTRES UTILIZANDO ANÁLISE MODAL E ELEMENTOS FINITOS**. 3, 1–7. http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0398_05.pdf

PRODUCTION OF PLA/EE-g-GMA NANOCOMPOSITES REINFORCED WITH CARBON NANOTUBES FOR ANTISTATIC APPLICATION

Data de submissão: 05/02/2024

Data de aceite: 01/03/2024

Carlos Bruno Barreto Luna

Federal University of Campina Grande,
Academic Unit of Materials Engineering,
Av. Aprígio Veloso, 882, 58429-900,
Campina Grande - Paraíba, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/3715843582747323>

Renate Maria Ramos Wellen

Federal University of Paraíba, Department
of Materials Engineering, Cidade
Universitária, 58051-900, João Pessoa,
PB, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/5406259642631461>

Edcleide Maria Araújo

Federal University of Campina Grande,
Academic Unit of Materials Engineering,
Av. Aprígio Veloso, 882, 58429-900,
Campina Grande - Paraíba, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/1097999681102529>

ABSTRACT: Poly(lactic acid) (PLA)/elastomeric ethylene grafted with glycidyl methacrylate (EE-g-GMA) nanocomposites were prepared, using carbon nanotubes (MWCNT) with conductive nanofiller. The PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites were processed in a twin-screw extruder and injection molded. The properties of impact strength, tensile strength, electrical conductivity (σ), and morphology were

determined. The impact strength of the PLA/EE-g-GMA blend increased by 442.5% compared to pure PLA, suggesting toughening occurred. Incorporating MWCNT into PLA/EE-g-GMA promoted a reduction in impact strength in the PLA/EE-g-GMA base-system; however, the nanocomposites are more tough than pure PLA. As the MWCNT content increased in the PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites, the elastic modulus increased, and the tensile strength reduced, compared to PLA/EE-g-GMA. Scanning electron microscopy (SEM) indicated a good interaction between PLA and EE-g-GMA, forming well-adhered and refined particles, justifying the high performance under impact of the PLA/EE-g-GMA blend. In contrast, MWCNT negatively affected the morphology of the nanocomposites, generating many voids with increasing MWCNT content. The PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr - part per hundred resin) nanocomposite has technological potential, considering it increased impact strength by 63.8% concerning pure PLA. In addition, it presented an electrical conductivity of $3.91 \times 10^{-06} \text{ S.cm}^{-1}$, an adequate value for possible antistatic application.

KEYWORDS: Poly(lactic acid), impact modifier, carbon nanotubes, nanocomposites, antistatic.

RESUMO: Nanocompósitos de poli(ácido láctico) (PLA)/etileno elastomérico enxertado com metacrilato de glicidila (EE-g-GMA) foram preparados, utilizando nanotubos de carbono (MWCNT) com nanocarga condutora. Os nanocompósitos PLA/EE-g-GMA/MWCNT foram processados em extrusora dupla rosca e moldados por injeção. As propriedades de resistência ao impacto, resistência à tração, condutividade elétrica (σ) e a morfologia foram determinadas. A resistência ao impacto da blenda PLA/EE-g-GMA aumentou em 442,5% em comparação ao PLA puro, sugerindo que houve tenacificação. A incorporação de MWCNT em PLA/EE-g-GMA promoveu uma redução na resistência ao impacto em relação ao sistema base PLA/EE-g-GMA, porém os nanocompósitos são mais tenazes do que o PLA puro. À medida que aumentou o teor de MWCNT nos nanocompósitos PLA/EE-g-GMA/MWCNT, o módulo elástico aumentou e a resistência à tração reduziu, em comparação com PLA/EE-g-GMA. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicou uma boa interação entre o PLA e o EE-g-GMA, formando partículas bem aderidas e refinadas, justificando o alto desempenho sob impacto da blenda PLA/EE-g-GMA. Em contraste, o MWCNT afetou de forma negativa a morfologia dos nanocompósitos, gerando grande quantidade de vazios com o aumento da concentração de MWCNT. O nanocompósito PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 pcr - partes por cem de resina) tem potencial tecnológico, tendo em vista que aumentou a resistência ao impacto em 63,8% em relação ao PLA puro. Em adição, apresentou uma condutividade elétrica de $3.91 \times 10^{-06} \text{ S.cm}^{-1}$, valor adequado para possível aplicação antiestática.

PALAVRAS-CHAVE: Poli(ácido láctico), modificador de impacto, nanotubos de carbono, nanocompósitos, antiestática.

INTRODUCTION

Due to the need for new and modern materials for engineering applications, polymers are constantly being improved to expand the range of mechanical properties, aiming to suit specific applications (Shameem et al., 2021; Kamal et al., 2022). Given this, polymer nanocomposites have gained considerable prominence in the scientific and industrial community. They are hybrid materials made up of a polymeric matrix containing an inorganic phase dispersed at a nanometric level (Sun et al., 2021; Darwish et al., 2022; Luna et al., 2022). In general, producing polymeric nanocomposites requires a low concentration of nanofillers (1-5%). However, achieving adequate dispersion of nanofillers in the polymer matrix directly improves mechanical, thermal, electrical, barrier, and dimensional stability properties (Oliveira et al., 2015; Teijido et al., 2022; Han et al., 2023; Pinto et al., 2023). Much attention has recently been paid to polymer nanocomposites reinforced with carbon-based nanofillers, especially for applications requiring conductive, flexible, and lightweight materials (Ryan et al., 2022; Zahid et al., 2023; Liu et al., 2023; Silva et al., 2024).

Carbon nanotubes are widely used as nanofillers, given their excellent characteristics of high resistance, high elastic modulus, electrical conductivity, good thermal properties, and good chemical stability (Anzar et al., 2020; Rathinavel et al., 2021). This has aroused great interest in its use in the preparation of polymeric nanocomposites, which are used to make products for the electronics sector (Anderson et al., 2021; Huang et al., 2023; Kausar

and Ahmad, 2023; Luna et al., 2023). At the same time, the reduction in the price of carbon nanotubes, especially multi-walled nanotubes (MWCNT), has contributed to their use on larger scales (Volder et al., 2013; Lopes et al., 2016). Currently, progress has been made in producing conductive nanocomposites using polymer matrices from renewable sources, with emphasis on poly(lactic acid) (PLA) (Kuang et al., 2023; Bikiaris et al., 2023).

PLA is one of the main biodegradable polymers used commercially, processed by extrusion and injection. It has good transparency, high elastic modulus, good tensile strength, and good Shore D hardness (Jem and Tan, 2020; Taib et al., 2023). Considering this, PLA is being investigated to produce nanocomposites with carbon nanotubes, aiming to produce new tailor-made materials (Bai et al., 2020; Norazlina and Kamal, 2021; Vidakis et al., 2021). However, PLA main drawback is low impact strength, causing limitations in the production of products requiring toughness. This problem has been solved through the production of nanocomposites obtained from PLA polymer blends, which form a tough material and expand its application possibilities (Brito et al., 2014).

There are reports in the literature on nanocomposites of blends based on PLA and carbon nanotubes using polycaprolactone (PCL) (Urquijo et al., 2017), poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHBV) (Silva et al., 2021), poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) (Sarul et al., 2021) and ethylene vinyl acetate (EVA) (Wang et al., 2022). However, the number of publications on PLA/carbon nanotubes nanocomposites with impact modifiers functionalized with glycidyl methacrylate still needs to be increased, generating the need for new investigations. Given the above, poly(lactic acid) nanocomposites were prepared with carbon nanotubes (MWCNT) using elastomeric ethylene grafted with glycidyl methacrylate (EE-g-GMA) as an impact modifier. The nanocomposites were processed in a co-rotating twin-screw extruder and injection molded, aiming for mechanical, electrical, and morphological characterizations.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

Materials

- Poly(lactic acid) (PLA) was used as a polymeric matrix, with 1.24 g/cm³ and a melt flow index (MFI) of 6.0 g/10 min (ASTM D1238 - 190°C/2.16 kg), in the form of granules, supplied by 3DLab.
- The impact modifier was elastomeric ethylene grafted with glycidyl methacrylate (EE-g-GMA), with the commercial code Coace® W5D. The grafting content of glycidyl methacrylate is greater than 0.8%, with a density of 0.92 g/cm³ and a melt flow index of 8-16 g/10 min (ASTM D1238 - 190°C/2.16 kg), in the form of granules and supplied by Xiamen Coace Plastic Technology Co., Ltd.

- Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) were utilized as nanometric fillers, with HQNANO CNTs-010 code. These were prepared through chemical vapor deposition (CVD), which was provided by Advanced 2D Materials Co., Ltd. The specifications include 95% purity, inner diameter of 3-5 nm, outer diameter of 8-15 nm, specific surface area greater than 233 m²/g, and density of 0.15 g/cm³.

Extrusion processing

Before processing the nanocomposites, the PLA, EE-g-GMA, and MWCNT were dried in a vacuum oven at 60 °C for 24 hours. To obtain the nanocomposites in the molten state, PLA/MWCNT concentrates were initially prepared using the melt intercalation method (laboratory mixer from Thermo Scientific), with roller-type rotors, operating at 60 rpm at a temperature of 180 °C, for 3 minutes. The PLA/MWCNT concentrate was crushed in a knife mill, giving rise to Flakes for dilution in the extruder. The compositions developed were PLA/EE-g-GMA + MWCNT (70/30% by mass + 1 phr; 70/30% by mass + 3 phr; and 70/30% by mass + 5 phr). MWCNT was used as a complementary additive to induce electrical conductivity in the nanocomposites, and therefore, phr (parts per hundred of resin) was adopted.

The PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites were mixed manually and subsequently prepared by mixing in the melt state in a modular co-rotational twin-screw extruder from Coperion Werner & Pfleiderer, with screw diameters (D) of 18 mm and L/D = 40. The following process parameters were used: screw speed of 250 rpm, flow rate of 4 kg/h and temperature profile of 160°C – 170°C - 170°C - 180°C – 180°C - 190°C - 190 °C. Pure PLA and the PLA/EE-g-GMA blend were processed under the same conditions as the nanocomposites, aiming for a comparative effect. After processing, the pure PLA, PLA/EE-g-GMA blend, and the PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites were granulated in the extruder, dried at 60 °C in a vacuum oven for 24 h for subsequent injection molding.

Injection/compression molding process

The injection molded samples were produced on an Arburg injection molding machine, Model Allrounder 207C Golden Edition. Test specimens were produced for impact testing and tensile strength, following ASTM D256 and ASTM D638 recommendations. The molding parameters adopted were injection pressure = 1000 bar; holding pressure = 500 bar; temperature profile = 160°C, 170°C, 170°C, 180°C and 190°C; mold temperature = 20°C; and cooling time in the mold = 25 s.

The extruded granules were used to develop films for electrical conductivity testing. A mold approximately 1 mm thick was used in a hydraulic press at 190°C for 4 min and pressure of 5 tons. The film was cooled at room temperature for 10 min under a load of 50 N.

Nanocomposite characterization

The Izod impact strength test was carried out on notched specimens, according to the ASTM D256 standard, in a Ceast model Resil 5.5 J machine, operating with a 2.75 J hammer, at room temperature ($\sim 23^{\circ}\text{C}$). The results were analyzed using an average of seven specimens.

The tensile test was conducted on the injected specimens following the ASTM D638 standard. The Oswaldo Filizola BME universal testing machine was used with a speed of 5 mm/min and a load cell of 20 kN, at room temperature ($\sim 23^{\circ}\text{C}$). The results were analyzed using an average of seven specimens.

The electrical conductivity analysis was carried out on PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposite films, using the Keithley electrometer, model 6517B, using the volumetric method as equipment.

Scanning electron microscopy (SEM) analyses were carried out on the fracture surfaces of the specimens subjected to the impact test. A scanning electron microscope, VEGAN 3 TESCAN, was used at a voltage of 30 kV under high vacuum. The fracture surfaces of the samples were coated with gold.

RESULTS AND DISCUSSION

A Figuras 1 (a-d) mostra a superfície de fratura sob o teste de impacto, realizado à temperatura ambiente, da blenda PLA/EE-g-GMA e dos nanocompósitos. In Figure 1 (a), the PLA/EE-g-GMA blend has a biphasic structure with spherical EE-g-GMA particles dispersed in the PLA matrix. This observation indicates the formation of an immiscible blend with different phases. The EE-g-GMA particles are well adhered to the PLA matrix, which indicates that the interface did not fracture during the impact test. The good adhesion in the morphology suggests that the EE-g-GMA copolymer promoted a good interaction with the PLA, possibly due to low interfacial tension, thus making the interface resistant. Brito et al. (2014) indicated that the epoxy group is capable of reacting with the carboxyl and/or hydroxyl terminal groups of PLA. Therefore, the stability in the morphology of the PLA/EE-g-GMA blend was probably due to interactions between the EE-g-GMA epoxy ring and the PLA terminal groups, which generated stabilization in the morphology and minimized coalescence. The compatibility between PLA and EE-g-GMA, visualized through the morphology of the fracture surface, corroborates the high-impact performance presented later. Adding MWCNT to the PLA/EE-g-GMA blend promoted the formation of a coarser morphology. As the MWCNT content increased, voids appeared in the nanocomposites, indicating that EE-g-GMA particles were detached from the PLA matrix during the impact test. The most dramatic effect was for the PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr) nanocomposite, as it severely increased the number of voids. This indicates that MWCNT negatively affected the interaction of the epoxy group of EE-g-GMA with PLA, resulting in a reduction in interfacial adhesion.

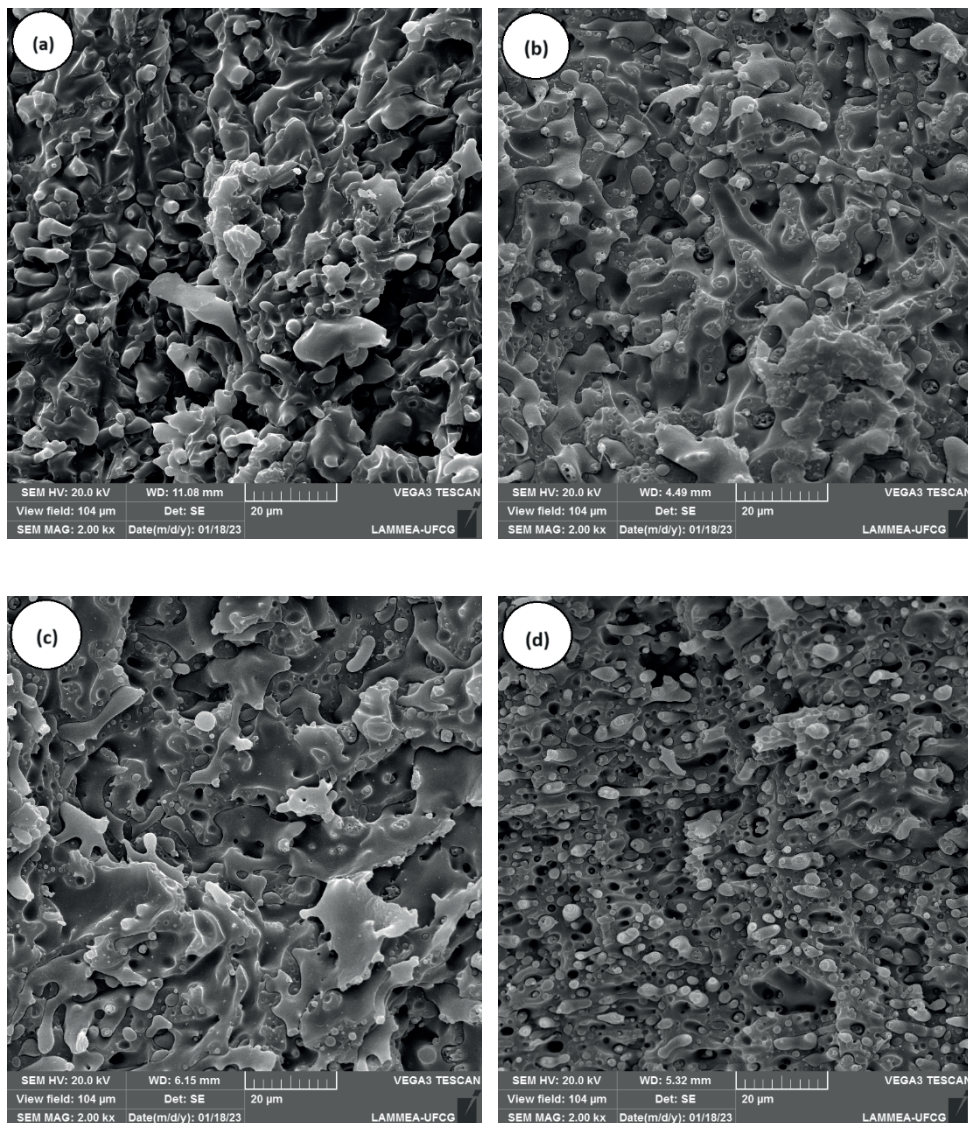


Figure 1. Evolution of morphology at 2000x magnification, for: (a) PLA/EE-g-GMA; (b) PLA/EE-g-GMA/MWCNT (1 phr); (c) PLA/EE-g-GMA/MWCNT (3 phr); (d) PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr).

Figure 2 shows the morphology of the PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites at 22000x magnification, aiming to evaluate the distribution of carbon nanotubes. For higher MWCNT content in nanocomposites, there was a tendency to increase the distribution of carbon nanotubes, especially with 5 phr. Consequently, it favored the formation of a conductive network in nanocomposites, resulting in the formation of materials with electrical conduction capacity, as presented later.

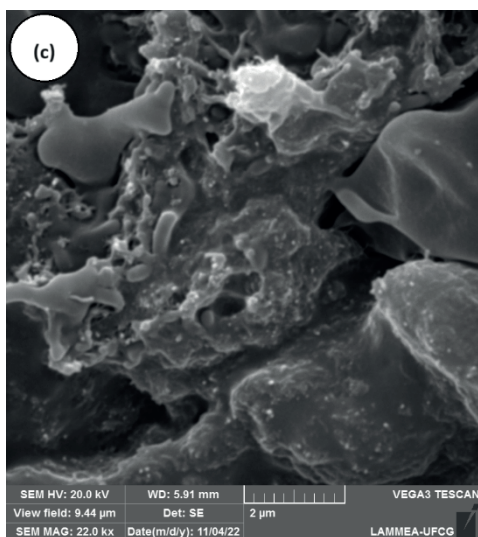
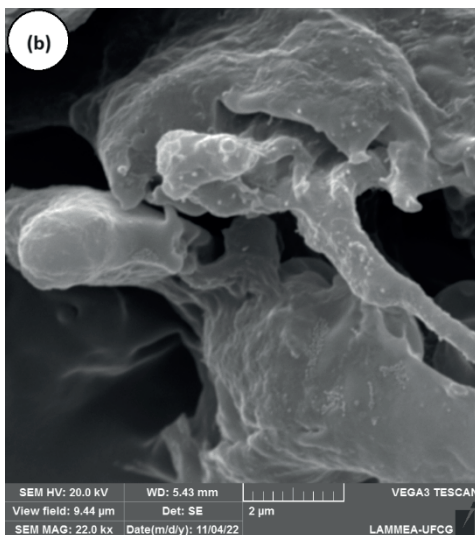
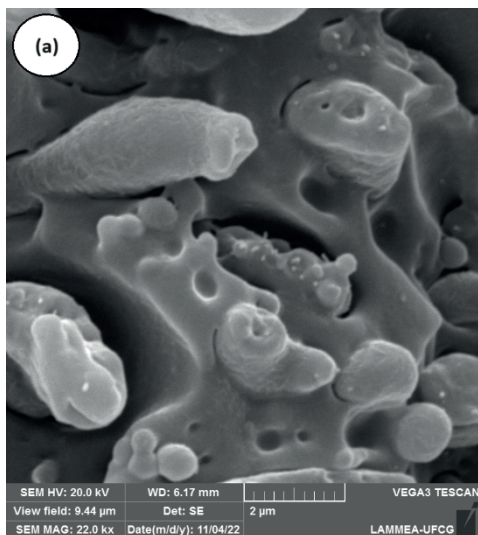


Figure 2. Morphology obtained by SEM at 22000x magnification, for: (a) PLA/EE-g-GMA/MWCNT (1 phr); (b) PLA/EE-g-GMA/MWCNT (3 phr); (c) PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr).

Figure 3 shows the impact strength of pure PLA, the PLA/EE-g-GMA blend, and nanocomposites with different MWCNT contents.

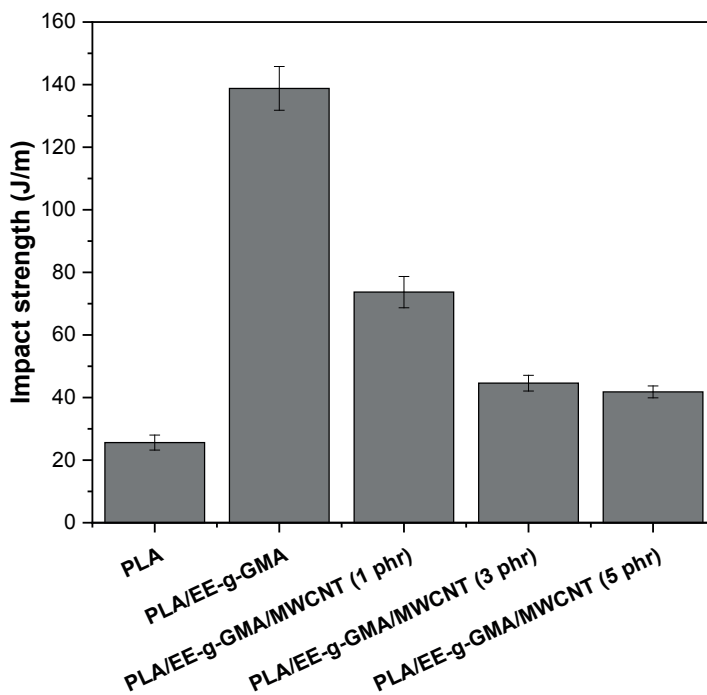


Figure 3. Impact strength of pure PLA, the PLA/EE-g-GMA blend, and nanocomposites.

As shown in Figure 3, pure PLA presented a low impact strength (25.6 J/m), a value considered to be a brittle polymer. Similar results were also reported in the literature (Wang et al., 2017; Ferreira et al., 2023). The PLA/EE-g-GMA blend exhibited an impact strength of 138.9 J/m, corresponding to a gain of 442.5%, compared to pure PLA. This demonstrates that the EE-g-GMA copolymer efficiently toughened the PLA, possibly due to the good interaction between the components, as seen in the SEM. The epoxy ring in the glycidyl methacrylate group of EE-g-GMA promoted good interaction with the carboxyl and/or hydroxyl terminal groups of PLA, forming a strong interface (Araújo et al., 2019). Consequently, there was a good stress transfer at the interface of the PLA/EE-g-GMA blend, favoring better dissipation and distribution of energy in the PLA matrix and resulting in a more effective toughening mechanism. Adding MWCNT negatively affected the impact strength of nanocomposites, indicating a stress-concentrating effect. This is because MWCNT is a rigid nanofiller that restricts molecular mobility, increasing fragility. It was observed that as the concentration of MWCNT increased, the impact strength of the nanocomposites continuously reduced. The incorporation of 1 phr of MWCNT reduced impact strength by 46.9% compared to the PLA/EE-g-GMA blend. Upon increasing the MWCNT content to 3 phr and 5 phr, the blend's impact strength reduces by around 67.8% and 29.8%, respectively, compared to the base blend. However, the results of PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites were higher than those of pure PLA, suggesting that they are more tough. For example, the PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr) nanocomposite achieved an increase in impact strength of 63.8% when compared to pure PLA.

Figure 4 reports the elastic modulus (E) and tensile strength (TS) of pure PLA, the PLA/EE-g-GMA blend, and the nanocomposites.

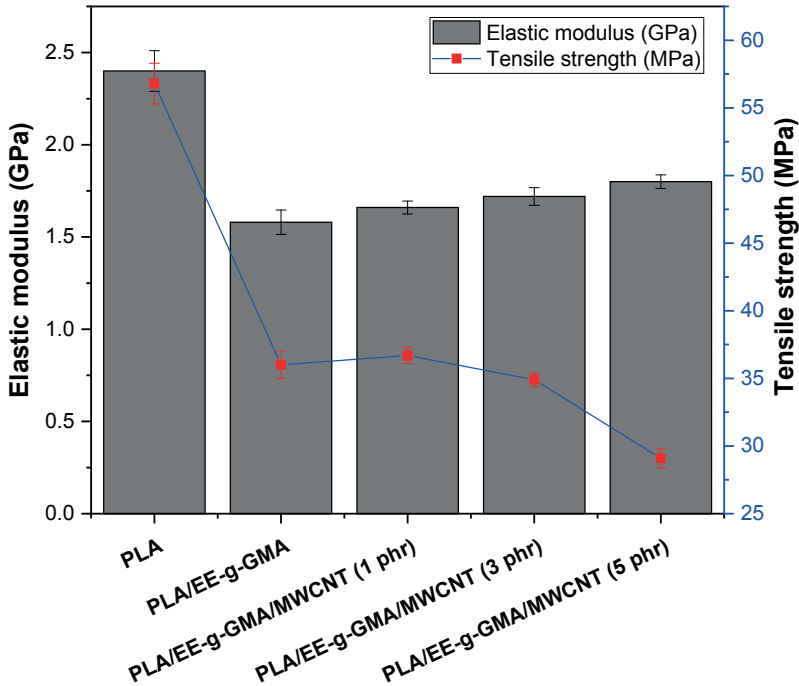


Figure 4. Mechanical properties under tensile for pure PLA, the PLA/EE-g-GMA blend, and the nanocomposites.

The highest elastic modulus value was for pure PLA with 2.4 GPa, indicating the highest stiffness among all materials. Incorporating 30% of EE-g-GMA into the PLA matrix had a deleterious effect on the elastic modulus, reducing it by 34.5%. This reduction in the elastic modulus was due to the addition of EE-g-GMA, considering that it has elastomeric behavior and, therefore, increases the flexibility of the PLA/EE-g-GMA blend. Regarding the PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites, there was a continuous increase in the elastic modulus compared to PLA/EE-g-GMA. This is attributed to MWCNT being a rigid nanofiller, thus generating restriction in molecular mobility and increasing rigidity. The recovery in elastic modulus was more evident in the nanocomposite containing 5 phr of MWCNT, with a gain of 14% in relation to the PLA/EE-g-GMA system.

The tensile strength of PLA, 56.8 MPa, indicated that it required a greater load to deform. As expected, the greater flexibility of the PLA/EE-g-GMA blend reduced the tensile strength to 36 MPa. It was observed that the tensile strength reached a maximum value for the nanocomposite with up to 1 phr of MWCNT, with a value of 36.7 MPa. However, the value is very close to that of the PLA/EE-g-GMA blend, given the margin of experimental

error. The tensile strength decreased smoothly above a concentration of 1 phr of MWCNT, suggesting stress concentration. The results indicate that carbon nanotubes (MWCNT), at 3 phr and 5 phr levels, did not act as reinforcement in the PLA/EE-g-GMA system, given the harmful effect on tensile strength.

Table 1 presents the electrical conductivity (σ) of pure PLA, the PLA/EE-g-GMA blend, and the PLA/EE-g-GMA/MWCNT nanocomposites as a function of the carbon nanotube content. As reported in the literature (Yadav et al., 2020), the characteristics of materials in electrical properties are insulating (10^{-12} - 10^{-22} S/cm), semiconductors (10^{-2} - 10^{-9} S/cm), conductors (10^2 S/cm), and superconductors (10^{20} S/cm).

Samples	Electric conductivity (S.cm ⁻¹)
PLA	7.24 x 10 ⁻¹²
PLA/EE-g-GMA	4.37 x 10 ⁻¹²
PLA/EE-g-GMA/MWCNT (1 phr)	7.11 x 10 ⁻¹¹
PLA/EE-g-GMA/MWCNT (3 phr)	5.31 x 10 ⁻⁰⁸
PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr)	3.91 x 10 ⁻⁰⁶

Table 1. Electrical conductivity results of PLA, the PLA/EE-g-GMA blend, and the nanocomposites.

Pure PLA showed an electrical conductivity of 7.24 x 10⁻¹² S.cm⁻¹, which remains unchanged in the order of magnitude in the PLA/EE-g-GMA blend (4.37 x 10⁻¹² S.cm⁻¹), suggesting that they are insulating materials. Similar results for PLA were also observed in the literature (Wang et al., 2016; Silva et al., 2020). The nanocomposite with a content of up to 1 phr of MWCNT showed a slight increase in electrical conductivity to 7.11 x 10⁻¹¹ S.cm⁻¹, but maintained its insulating behavior. A higher proportion of MWCNT (3 phr and 5 phr) in the nanocomposites caused a more prominent increase in electrical conductivity, which indicates the formation of a three-dimensional conductive network. The addition of 5 phr of MWCNT detected a significant change in electrical conductivity, 10⁶ times, reaching approximately 3.91x10⁻⁶ S.cm⁻¹. As verified in the SEM, the higher MWCNT content promoted increased distribution in the PLA matrix. This led to the formation of a more efficient conductive path in the nanocomposite with 5 phr of MWCNT, resulting in a semiconductor behavior. For example, electrical conductivity greater than 10⁻⁸ S.cm⁻¹ is required for antistatic application (Pascual et al., 2012). Given this, the PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr) nanocomposite indicates the potential to be used in applications where electrostatic dissipation is required.

CONCLUSION

This work produced semi-biodegradable PLA/EE-g-GMA nanocomposites reinforced with carbon nanotubes (MWCNT), aiming at likely antistatic application. The EE-g-GMA copolymer promoted interaction with PLA, forming a tough blend at room temperature. The addition of carbon nanotubes to the PLA/EE-g-GMA blend, regardless of the MWCNT content, formed nanocomposites with impact strength superior to pure PLA. However, the toughening mechanism of the PLA/EE-g-GMA blend was inhibited in the presence of MWCNT, given the decline in the impact strength of the nanocomposites for higher MWCNT content. This behavior was sustained with the increase in the elastic modulus, indicating greater stiffness of the nanocomposites compared to the PLA/EE-g-GMA blend. Regarding tensile strength, it was found that up to 1 phr of MWCNT, there was a slight reinforcing effect, but above this value, the property began to suffer a harmful effect. The SEM morphology indicated that a higher concentration of MWCNT promoted inhibition of the interaction between the PLA and EE-g-GMA phases, generating many particles torn off during the impact test. On the other hand, a higher concentration of MWCNT provided a more accentuated distribution in the PLA/EE-g-GMA system, forming a conductive network, especially with 5 phr of MWCNT. Overall, the PLA/EE-g-GMA/MWCNT (5 phr) nanocomposite presented adequate electrical conductivity for static charge dissipation applications.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to CNPq (National Council for Scientific and Technological Development, Brasília/DF, Brazil) (Process: 350025/2023-1). Prof Edcleide Araújo (Number: 312014/2020-1) and Prof Renate Wellen (Number: 303426/2021-7) are CNPq fellows. The authors deeply thank UFCG for the infrastructure.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest and all authors have agreed with this submission and they are aware of the content.

REFERENCES

Anderson, L.; Govindaraj, P.; Ang, A.; Mirabedini, A.; Hameed, N. (2021). Modelling, fabrication and characterization of graphene/polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications. **Carbon Trends**, 4, 100047.

Araújo, J. P.; Oliveira, A. D. B.; Cavalcanti, S. N.; Agrawal, P.; Mélo, T. J. A. (2019). Combined effect of copolymers and of the mixing sequence on the rheological properties and morphology of poly(lactic acid) matrix blends. **Materials Chemistry and Physics**, 237, 121818.

- Anzar, N.; Hasan, R.; Tyagi, M.; Yadav, N.; Narang, J. (2020). Carbon nanotube - A review on Synthesis, Properties and plethora of applications in the field of biomedical science. **Sensors International**, 1, 100003.
- Bai, T.; Zhu, B.; Liu, H.; Wang, Y.; Song, G.; Liu, C.; Shen, C. (2020). Biodegradable poly(lactic acid) nanocomposites reinforced and toughened by carbon nanotubes/clay hybrids. **International Journal of Biological Macromolecules**, 151, 628-634.
- Bikiaris, N. D.; Koumentakou, I.; Samiotaki, C.; Meimaroglu, D.; Vartimidou, D.; Karatza, A.; Kalantzis, Z.; Roussou, M.; Bikiaris, R. D.; Papageorgiou, G. Z. (2023). Recent Advances in the Investigation of Poly(lactic acid) (PLA) Nanocomposites: Incorporation of Various Nanofillers and their Properties and Applications. **Polymers**, 15, 1196.
- Brito, G. F.; Agrawal, P.; Araújo, E. M.; Mélo, T. J. A. (2014). Effect of combining ethylene/methyl acrylate/glycidyl methacrylate terpolymer and an organoclay on the toughening of poly(lactic acid). **Polymer Engineering and Science**, 54, 1922-1930.
- Darwish, M. S. A.; Mostafa, M. H.; Harbi, L. M. A. (2022). Polymeric Nanocomposites for Environmental and Industrial Applications. **International Journal of Molecular Sciences**, 23, 1023.
- Ferreira, E. S. B.; Nascimento, E. P.; Luna, C. B. B.; Filho, E. A. S.; Wellen, R. M. R.; Araújo, E. M. (2023). Tailoring the performance of poly(lactic acid)-based reactive blends: The effect of vinyl acetate and dicumyl peroxide content. **Journal Applied Polymer Science**, 140, e54353.
- Han, W. H.; Wang, Q. Y.; Kang, Y. Y.; Zhou, X.; Hao, C. C. (2023). Electrospun polymer nanocomposites for thermal management: a review. **Nanoscale**, 15, 2003-2017.
- Huang, M. L.; Shi, Y. D.; Wang, M. (2023). A comparative study on nanoparticle network-dependent electrical conductivity, electromagnetic wave shielding effectiveness and rheological properties in multiwall carbon nanotubes filled polymer nanocomposites. **Polymer Composites**, 44, 1188-1200.
- Jem, K. J.; Tan, B. (2020). The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, 3, 60-70.
- Kamal, A.; Ashmawy, M.; S, S.; Algazzar, A. M.; Elsheikh, A. H. (2022). Fabrication techniques of polymeric nanocomposites: A comprehensive review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 236, 4843-4861.
- Kausar, A.; Ahmad, I. (2023). Conducting Polymer Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding—Radical Developments. **Journal of Composites Science**, 7, 240.
- Kuang, T.; Zhang, M.; Chen, F.; Fei, Y.; Yang, J.; Zhong, M.; Wu, B.; Liu, T. (2023). Creating poly(lactic acid)/carbon nanotubes/carbon black nanocomposites with high electrical conductivity and good mechanical properties by constructing a segregated double network with a low content of hybrid nanofiller. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, 6, 48.
- Liu, Y.; Lu, S.; Luo, J.; Zhao, Y.; He, J.; Liu, C.; Chen, Z.; Yu, X. (2023). Research progress of antistatic-reinforced polymer materials: A review. **Polymers for Advanced Technnologies**, 34, 1393-1404.
- Lopes, M. C.; Trigueiro, J. P. C.; Castro, V. G.; Lavall, R. S.; Silva, G. G. (2016). Optimization of carbon nanotubes dispersion process in thermoset polyurethane. **Polímeros**, 26, 81-91.

Luna, C. B. B.; Silva, A. L.; Siqueira, D. D.; Filho, E. A. S.; Araújo, E. M.; Nascimento, E. P.; Costa, A. C. F. M. (2022). Preparation of flexible and magnetic PA6/SEBS-MA nanocomposites reinforced with Ni-Zn ferrite. **Polymer Composites**, 43, 68-83.

Luna, C. B. B.; Nascimento, E. P.; Siqueira, D. D.; Soares, B. G.; Agrawal, P.; Mélo, T. J. A.; Araújo, E. M. (2023). Tailoring Nylon 6/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites for Application against Electromagnetic Interference: Evaluation of the Mechanical, Thermal and Electrical Behavior, and the Electromagnetic Shielding Efficiency. **International Journal of Molecular Science**, 23, 9020.

Norazlina, H.; Kamal, Y. (2021). Elucidating the plasticizing effect on mechanical and thermal properties of poly(lactic acid)/carbon nanotubes nanocomposites. **Polymer Bulletin**, 78, 6911–6933.

Oliveira, A. D.; Castro, L. D. C.; Jung, M. K.; Pessan, L. A. (2015). Influence of nanoclay modification on the mechanical, thermo-mechanical and morphological properties of polyamide 6/Acrylonitrile-EPDM-Styrene blend-based nanocomposites. **Polímeros**, 25, 219-228.

Pascual, A. M. D.; Naffakh, M.; Marco, C.; Ellis, G. (2012). Mechanical and electrical properties of carbon nanotube/poly(phenylene sulphide) composites incorporating polyetherimide and inorganic fullerene-like nanoparticles. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 43, 603-612.

Pinto, G. M.; Cremonuzzi, J. M. O.; Ribeiro, H.; Andrade, R. J. E.; Demarquette, N. R.; Fachine, G. J. M. (2023). From two-dimensional materials to polymer nanocomposites with emerging multifunctional applications: A critical review. **Polymer Composites**, 44, 1438-1470.

Rathinavel, S.; Priyadarshini, K.; Panda, D. (2021). A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. **Materials Science and Engineering: B**, 268, 115095.

Ryan, K. R.; Down, M. P.; Hurst, N. J.; Keefe, E. M.; Banks, C. E. (2022). Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications. **eScience**, 2, 365-381.

Sarul, D. S.; Arslan, D.; Vatansever, E.; Kahraman, Y.; Durmus, A.; Salehiyan, R.; Nofar, M. (2021). Preparation and characterization of PLA/PBAT/CNC blend nanocomposites. **Colloid and Polymer Science**, 299, 987-998.

Shameem, M. M.; Sasikanth, S. M.; Annamalai, R.; Raman, R. G. (2021). A brief review on polymer nanocomposites and its applications. **Materialstoday: Proceedings**, 45, 2536-2539.

Silva, F. S.; Luna, C. B. B.; Ferreira, E. S. B.; Costa, A. R. M.; Wellen, R. M. R.; Araújo, E. M. (2024). Polyamide 6 (PA6)/carbon nanotubes (MWCNT) nanocomposites for antistatic application: tailoring mechanical and electrical properties for electronic product protection. **Journal of Polymer Research**, 31, 15.

Silva, A. P. B.; Montagna, L. S.; Passador, F. R.; Rezende, M. C.; Lemes, A. P. (2021). Biodegradable nanocomposites based on PLA/PHBV blend reinforced with carbon nanotubes with potential for electrical and electromagnetic applications. **Express Polymer Letters**, 15, 987-1003.

Silva, T. F.; Menezes, F.; Montagna, L. S.; Lemes, A. P.; Passador, F. R. (2020). Synergistic effect of adding lignin and carbon black in poly(lactic acid). **Polímeros**, 30, e2020002.

Sun, X.; Huang, C.; Wang, L.; Liang, L.; Cheng, Y.; Fei, W.; Li, Y. (2021). Recent Progress in Graphene/ Polymer Nanocomposites. **Advanced Materials**, 33, 2001105.

Taib, N. A. A. B.; Rahman, M. R.; Huda, D.; Kuok, K. K.; Hamdan, S.; Bakri, M.; K. B.; Julaihi, M. R. M. B.; Khan, A. (2023). A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. **Polymer Bulletin**, 80, 1179-1213.

Teijido, R.; Rubio, L. R.; Echaide, A. G.; Vilela, J. L. V.; Mendez, S. L.; Zhang, Q. (2022). State of the art and current trends on layered inorganic-polymer nanocomposite coatings for anticorrosion and multi-functional applications. **Progress in Organic Coatings**, 163, 106684.

Urquijo, J.; Dagréou, S.; Echevarría, G. G.; Eguiazábal, J. I. (2017). Morphology and properties of electrically and rheologically percolated PLA/PCL/CNT nanocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, 134, 45265.

Wang, L.; Gramlich, W. M.; Gardner, D. S. (2017). Improving the impact strength of poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM). **Polymer**, 114, 242-248.

Wang, P.; Song, T.; Dief, H. M. A.; Song, J.; Alanazi, A. K.; Fan, B.; Huang, M.; Lin, Z.; Altalhi, A. A.; Gao, S.; Yang, L.; Liu, J.; Feng, S.; Cao, T. (2022). Effect of carbon nanotubes on the interface evolution and dielectric properties of polylactic acid/ethylene–vinyl acetate copolymer nanocomposites. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, 5, 1100-1110.

Wang, L.; Qiu, J.; Sakai, E.; Wei, X. (2016). The relationship between microstructure and mechanical properties of carbon nanotubes/polylactic acid nanocomposites prepared by twin-screw extrusion. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 89, 18-25.

Vidakis, N.; Petousis, M.; Kourinou, M.; Velidakis, E.; Mountakis, N.; Griffiths, P. E. F.; Grammatikos, S.; Tzounis, L. (2021). Additive manufacturing of multifunctional polylactic acid (PLA)—multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) nanocomposites. **Nanocomposites**, 7, 184-199.

Volder, M. F. L.; Tawfick, S. H.; Baughman, R. H.; Hart, A. J. (2013). Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. **Science**, 339, 535-539.

Yadav, R.; Tirumali, M.; Wang, X.; Naebe, M.; Kandasubramanian, B. (2020). Polymer composite for antistatic application in aerospace. **Defence Technology**, 16, 107-118.

Zahid, M.; Anum, R.; Siddique, S.; Shakir, H. F.; Rehan, Z. A. (2023). Polyaniline-based nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications: A review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, 36, 1717-1761.

BODE PLOTTER – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO ELETRÔNICO AUXILIADO POR COMPUTADOR PARA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE SISTEMAS DINÂMICOS

Data de aceite: 01/03/2024

Erick H. L. dos Santos

Instituto Federal do Maranhão, MA

Rafael J. M. Santos

Instituto Federal do Maranhão, MA

Eric A. V. Prohmann

Instituto Federal do Maranhão, MA

Eliúde T. Moraes

Instituto Federal do Maranhão, MA

Almir S. e S. Neto[†]

Instituto Federal do Maranhão, MA

Este projeto foi financiado por meio de bolsa pelo Instituto Federal do Maranhão (IFMA), edital PIBIT Ensino Superior 2020-2021

ABSTRACT: Frequency response methods are of fundamental importance for dynamical systems analysis. Bode diagrams, in particular, consist of a graphical method of representing the frequency response of systems which can be used for the design and analysis of electrical filters, control systems, communication systems,

etc. In this context, this article presents the development of an equipment (Bode Plotter) based on the Arduino platform and aided by a computer, which has a graphical user interface (in Python) to view the Bode magnitude diagram of real dynamical systems. The structure and development of the Bode Plotter, as well as experimental results performed in two test systems are presented to validate the project proposal.

KEYWORDS: Frequency response; Bode magnitude diagram; Arduino; Python; Bode Plotter.

RESUMO: Os métodos de resposta em frequência são de fundamental importância para a análise de sistemas dinâmicos. Os diagramas de Bode, em particular, consistem num método gráfico de representação da resposta em frequência de sistemas os quais podem ser utilizados para projetos e análise de filtros elétricos, sistemas de controle, sistemas de comunicação, etc. Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um equipamento (Bode Plotter) baseado na plataforma Arduino e auxiliado por computador, o qual possui uma interface gráfica de usuário (em *Python*) para exibir o traçado do diagrama de Bode de magnitude de sistemas dinâmicos

reais. A estrutura e desenvolvimento do Bode Plotter, bem como resultados experimentais realizados em dois sistemas-teste são apresentados para validar a proposta do projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Resposta em frequência; diagrama de Bode de magnitude; Arduino; Python; Bode Plotter.

INTRODUÇÃO

Os métodos de resposta em frequência remontam à década de 1930. Nesse período já existiam duas abordagens bem definidas para analisar o comportamento de sistemas com realimentação. A primeira é a abordagem da resposta temporal, a qual envolve equações diferenciais ordinárias e as suas equações algébricas características associadas. A segunda é a abordagem da resposta em frequência, que envolve diagramas de Nyquist e Bode, funções de transferência, etc., a qual foi bastante utilizada para estudo de amplificadores com realimentação (MacFarlane, 1979). Assim, os métodos de resposta em frequência se constituem um importante ramo da teoria de controle. Segundo Marshall (1978), “Esta abordagem para a investigação do desempenho do sistema fornece uma alternativa para os métodos de resposta transitória e métodos de lugar das raízes e é preferida por muitos engenheiros de controle, especialmente aqueles com formação em engenharia elétrica”. De forma mais específica, métodos de resposta em frequência consideram o comportamento do sistema devido a uma excitação senoidal de entrada. A informação obtida, por conseguinte, pode ser usada para determinar a estabilidade em malha fechada a partir da resposta de frequência em malha aberta.

MacFarlane (1979), em seu artigo intitulado “*The Development of Frequency-Response Methods in Automatic Control*”, afirma que um evento bastante relevante no desenvolvimento de métodos de resposta em frequência foi o aparecimento do artigo clássico de Nyquist (1932) sobre estabilidade de amplificadores realimentados, que surgiu diretamente do trabalho sobre os problemas de telefonia de longa distância (MacFarlane, 1979). Desse modo, desde a década de 1930 as respostas em frequência têm sido instrumentos consagrados para analisar e projetar sistemas técnicos de desempenho dinâmico, dispositivos elétricos, mecânicos, reguladores de processos industriais, servomecanismos, etc. Entre as principais ferramentas empregadas pelos métodos de resposta em frequência estão os chamados *diagramas de Bode*, os quais consistem de um método gráfico que objetiva determinar curvas módulo (magnitude) *versus* frequência e fase *versus* frequência considerando a função de transferência em regime permanente do sistema dinâmico. Os chamados diagramas de Bode surgiram como *ferramenta gráfica fundamental para os métodos de resposta em frequência* (Castrucci et al., 2018).

Hendrik W. Bode (1905 – 1982), o qual propôs o referido método gráfico, teve relevantes contribuições para a área de controle. A proposta dos diagramas de Bode é apresentada nos capítulos 14 e 15 da obra “*Network Analysis and Feedback Amplifier Design*”, publicada em 1945 (Bode, 1945). Basicamente, os diagramas de Bode consistem

na representação gráfica da resposta em frequência de um sistema, que por definição, é a *transformada de Fourier* da resposta ao impulso do sistema. Tal resposta, aqui denotada por $H(j\omega)$ é uma função complexa da frequência. A resposta em frequência de um sistema estável, linear e invariante no tempo, por conseguinte, consiste no conjunto das respostas do sistema, em regime permanente (após decorridos os transitórios), quando sinais senoidais de diversas frequências são aplicados na sua entrada (Castrucci et al., 2018). Em outras palavras, esses gráficos indicam o ganho e a defasagem que um sistema estável, linear e invariante no tempo oferece a um sinal de entrada senoidal considerando diversas frequências.

Assim, trata-se de uma ferramenta fundamental para análise e projeto de sistemas dinâmicos tais como filtros eletrônicos, amplificadores de áudio, sistemas de controle, circuitos para comunicação, entre outras aplicações que vão desde a análise de desempenho na frequência de circuitos integrados até análise de sistemas mecânicos. Em face de tal importância, o presente artigo apresenta o desenvolvimento prático de um equipamento que permita traçar os diagramas de Bode de magnitude de sistemas dinâmicos reais – um Bode Plotter utilizando a plataforma Arduino e auxiliado por computador com interface gráfica de usuário (GUI) desenvolvida em *Python*.

FUNDAMENTOS DA TEORIA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Do ponto de vista matemático, a teoria de resposta em frequência está baseada em ferramentas fundamentais as quais permitem a modelagem e análise matemática de sistemas dinâmicos no domínio da frequência. Uma destas ferramentas é a *Transformada de Laplace* - uma transformada integral desenvolvida pelo matemático francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827). De modo geral, as *transformadas integrais* estão entre as ferramentas muito úteis para a resolução de equações diferenciais. Uma transformada integral é uma relação da forma

$$F(s) = \int_{\alpha}^{\beta} K(s, t) f(t) dt, \quad (1)$$

onde a função $K(s, t)$ é uma função dada, chamada de núcleo da transformação, e os limites de integração α e β também são dados. É possível que $\alpha = -\infty$ ou $\beta = +\infty$, ou ambos. A relação (1) transforma a função f em uma outra função F , que é chamada a transformada de f (Boyce et al., 2020). Especificamente, no caso da Transformada de Laplace, o núcleo da transformação é a função $K(s, t) = e^{-st}$ (Dyke, 1999). A Transformada de Laplace é um método operacional que pode ser usado para solução de equações diferenciais lineares. Desse modo, diversas funções tais como funções senoidais, funções senoidais amortecidas e exponenciais podem ser convertidas para uma função algébrica

com uma variável complexa 's'. Portanto, se a função algébrica de variável complexa 's' for resolvida, por meio da Transformada de Laplace inversa é possível obter a solução da equação diferencial linear.

Assim, a transformada usa uma função tempo $f(t)$ e gera uma função de variável frequência $F(s)$ (Ogata, 2003). A Transformada de Laplace é definida pela expressão:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-st} dt, \quad (2)$$

onde: $f(t)$ é uma função de variável t ; s : uma variável complexa; e^{-st} : núcleo da transformada; $\mathcal{L}\{\cdot\}$: Símbolo operacional indicando que a função contida no argumento deve ser transformada por meio da integral de Laplace; $F(s)$: Transformada de Laplace de $f(t)$.

Funções de transferência

Funções de transferência são geralmente usadas para relacionar as entradas e saídas de um sistema ou componente que podem ser representados por equações diferenciais lineares invariantes no tempo. Em relação à modelagem matemática, são fundamentais para o entendimento de todos os processos que ocorrem no sistema, como um circuito, por exemplo. Além disso, os modelos matemáticos podem assumir diversas formas, dependendo do sistema e das circunstâncias. Tendo obtido o modelo de um sistema, é possível a análise e a síntese de modo analítico ou computacional. Admitindo-se que o sistema é linear e invariante no tempo e sendo $y(t)$ e $x(t)$ saída e a entrada do sistema respectivamente, a função de transferência é definida por:

$$\text{Função de transferência} = G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{saída}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} \quad (3)$$

Considerando todas as condições iniciais nulas. Assim:

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{saída}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (4)$$

Sendo 's' uma variável complexa, ela pode ser escrita como $s = \sigma + j\omega$. Isto reflete a consideração tanto do transitório quanto do regime permanente do sistema analisado. Contudo, ao falar de resposta em frequência de sistema, considera-se que os sinais se encontram em regime permanente, como será abordado a seguir.

Resposta em Frequência e Diagramas de Bode

A resposta em frequência de um sistema estável, linear e invariante no tempo consiste no conjunto de respostas do sistema, em *regime permanente*, isto é, após decorridos os transitórios, quando *sinais senoidais de diversas frequências* são aplicados na sua entrada

(Castrucci et al., 2018). As representações gráficas das resposta em frequência, por sua vez, possuem grande poder de informação sobre a dinâmica dos sistemas em geral, permitindo identificar experimentalmente modelos matemáticos que podem ser utilizados para fins de análise ou mesmo projetos de controle. Essa característica fundamental da resposta em frequência está baseada no fato de sinais periódicos arbitrários poderem ser representados como um soma infinita de senóides e adicionalmente, sinais aperiódicos podem ser representados no domínio da frequência a partir da transformada de Fourier.

Assim, considere um sistema estável, linear e invariante no tempo cuja função de transferência é designada por $G(s)$. Considere ainda que $G(s)$ está submetido a um sinal de entrada senoidal $u(t)$, de uma dada frequência ω e amplitude A , isto é:

$$u(t) = A \sin \omega t \quad (5)$$

cujas Transformada de Laplace é

$$U(s) = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

A Transformada de Laplace da saída é dada por

$$Y(s) = G(s)U(s) = G(s) \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (7)$$

É possível demonstrar que a saída $y(t)$ quando t tende a infinito, denotada por $y_{\infty}(t)$ é dada por

$$y_{\infty}(t) = -\frac{AG(-j\omega)}{2j}e^{-j\omega t} + \frac{AG(j\omega)}{2j}e^{j\omega t} \quad (8)$$

onde $G(j\omega)$ é obtido fazendo-se $s = j\omega$ na função $G(s)$. Uma forma alternativa de representar $G(j\omega)$ é por meio de seu módulo ($|G(j\omega)|$) e fase (ou argumento) ($\phi(\omega)$) uma vez que se trata de um número complexo:

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\phi(\omega)} \quad (9)$$

$$G(-j\omega) = |G(j\omega)|e^{-j\phi(\omega)} \quad (10)$$

Assim, têm-se:

$$y_{\infty}(t) = A|G(j\omega)| \sin \omega t + \phi(\omega) \quad (11)$$

Daí, são obtidas algumas conclusões:

- A saída em regime permanente de um sistema estável, linear e invariante no tempo com a entrada senoidal é também uma senóide com a mesma frequência da senóide de entrada;
- A amplitude da senóide de saída vale: $|Y(j\omega)| = |G(j\omega)||U(j\omega)| = A|G(j\omega)|$;
- A defasagem entre entrada e saída é dada por: $\phi(\omega) = \angle G(j\omega)$;

- Para obter a completa descrição dos efeitos da entrada senoidal do sistema $G(s)$ basta substituir s por $j\omega$ em $G(s)$ e calcular o módulo e a fase do número complexo resultante.

Segundo Castrucci et al. (2018), os **diagramas de Bode**, por sua vez, consistem em dois gráficos que, conjuntamente, representam a resposta em frequência:

- módulo de $G(j\omega)$ versus frequência ω , ambos em escala logarítmica;
- fase de $G(j\omega)$ versus frequência ω , esta última em escala logarítmica;

O módulo de $G(j\omega)$ também é normalmente representado por $20 \log |G(j\omega)|$, isto é, empregando a unidade decibel (dB).

FUNDAMENTOS DA PLATAFORMA VIRTUAL/ELETRÔNICA DO BODE PLOTTER

De modo a implementar a plataforma virtual/eletrônica do Bode Plotter com características de lidar com sinais de tensão e permitir a comunicação de dados com um computador, optou-se por uma abordagem baseada em microcontrolador. Neste caso, a escolha foi pela plataforma Arduino, a qual utiliza o microcontrolador ATmega328p. Nas seções a seguir serão apresentados todos os elementos que compõem a plataforma Bode Plotter, tais como a placa Arduino, o módulo DDS AD9850 (para gerar sinais senoidais) e demais circuitos de condicionamento de sinais necessários para a aplicação proposta.

A Plataforma Arduino

Segundo o próprio *site* oficial, “www.arduino.cc”, o projeto Arduino é definido como “uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* fáceis de usar. As placas Arduino são capazes de ler entradas - luz em um sensor, um dedo em um botão ou uma mensagem do Twitter - e transformá-la em uma saída - ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online [...] Ao longo dos anos, o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, de objetos do cotidiano a instrumentos científicos complexos. Uma comunidade mundial de criadores - estudantes, entusiastas, artistas, programadores e profissionais - reuniu-se em torno desta plataforma de código aberto, suas contribuições somaram uma quantidade incrível de conhecimento acessível que pode ser de grande ajuda para novatos e especialistas.”(ARDUINO, 2018). Banzi (2009) cita algumas características do Arduino que o tornam interessante para várias aplicações: É um ambiente multiplataforma – ele pode ser executado no *Windows*, *Macintosh* e *Linux* ; é baseado no IDE de programação *Processing*, um ambiente de desenvolvimento fácil de usar usado por artistas e projetistas; é utilizado por meio de conexão USB, não de uma porta serial; o *hardware* e *software* são de código aberto — se o usuário desejar, ele pode obter o diagrama de circuito, comprar todos os componentes, e desenvolver sua própria placa; existe uma comunidade ativa de usuários; o Projeto Arduino foi desenvolvido em

um ambiente educacional e, portanto, é ótimo para os recém- chegados fazerem as coisas funcionarem rapidamente.

No aspecto referente ao *hardware* Horowitz and Hill (2017) afirmam que “o *hardware* do Arduino é um conjunto bem concebido de placas de baixo custo, baseado em microcontroladores Atmel (a série ATmega e a série SAM3X ARM Cortex-M)”. Essas placas são equipadas com componentes tais como: porta USB (com o chip da FTDI para converter para os pinos seriais do microchip), regulador de 5 V, porta SPI, saída PWM, ADC, pinos de entrada/saída digitais, LEDs, entre outros componentes adicionais. O ambiente de desenvolvimento de *software* é de código aberto e livre baseado em linguagem C, que utiliza o compilador GNU voltado para os processador AVR e ARM. O *software* do Arduino consiste de uma interface gráfica de usuário (GUI) relativamente simples que é suportada pelos principais sistemas operacionais. Assim, o Arduino se mostra como uma excelente opção para experimentar programação e eletrônica. A placa Arduino UNO, em particular, é uma das mais utilizada da família dos microcontroladores, e, neste projeto, ela foi escolhida para integrar o núcleo da plataforma eletrônica. Entre as principais especificações da placa Arduino UNO estão um microprocessador ATmega328P, um ressonador de cerâmica de 16 MHZ (CSTCE16M0V53-R0), uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP, 14 pinos de entrada ou saída em que 6 deles podem ser usados como saída PWM, 6 entradas analógicas, pinos de referência GND, pino de alimentação 3.3 V e 5 V e o VIN (pino em que está tensão de entrada podendo ser usada para alimentar um shield) e um botão de reinicialização. Na Figura 1 é apresentada a placa Arduino UNO:

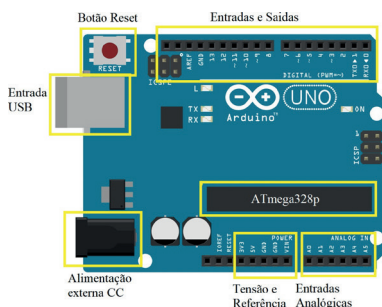


Figura 1. Plataforma Arduino UNO

O Gerador de Funções AD9850

Compatível com as plataformas Arduino, PIC e Atmel, o módulo HC-SR08, baseado no circuito integrado AD9850, é capaz de gerar sinais de forma precisa, conseguindo produzir 2 sinais de ondas senoidais e 2 de ondas quadradas. No entanto, ao ultrapassar os 20 – 30 MHz a onda começa a ter instabilidades. Para frequências menores, o sinal é estável e confiável e utilizando-se um potenciômetro é possível mudar a tensão de referência de

entrada. Por meio da tecnologia DDS e uma alta velocidade interna produz frequências digitalmente programáveis. Seu núcleo pode produzir uma palavra de 32 bits o que gera uma resolução de sintonia de 0,0291 Hz para uma referência de 125 MHz de entrada o que permite uma saída de até metade dessa referência (62,5 MHz) e sua frequência de saída pode ser mudada a uma taxa de 23 milhões de novas frequências por segundo, fornece também 5 bits de modulação de fase controlada digitalmente assim, possibilitando deslocamentos de 180, 90, 45, 22, 5, 11, 25 ou qualquer combinação desses.

Os ajustes podem ser feitos por carregamento serial de 40 bits em um único pino. O módulo usa tecnologia CMOS para fornecer esse nível de desempenho e funcionalidade. O AD9850 permite a manipulação rápida e precisa da frequência de saída sob controle totalmente digital. O módulo é capaz de sintetizar frequências, criando formas de onda arbitrárias a partir de um sintetizador direto digital AD9850 operando entre 3.3 V e 5 V. Na Figura 2 é apresentado o módulo descrito:

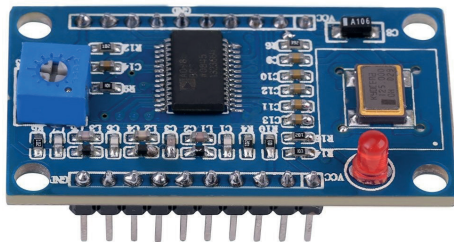


Figura 2. Módulo HC-SR08, o qual utiliza o CI AD9850.

Neste projeto, o módulo HC-SR08 (AD9850), será empregado para produzir os sinais senoidais numa faixa de frequência especificada para a excitação dos sistemas dinâmicos dos quais se deseja traçar o diagrama de Bode. O módulo será controlado a partir da programação desenvolvida em Arduino tanto para gerar os sinais de excitação, quanto para adquirir as informações de amplitude de entrada e saída para cada frequência aplicada.

ARQUITETURA DO BODE PLOTTER

A estrutura geral do Bode Plotter pode ser estruturada em cinco partes: o computador, o Arduino (ou outra placa de circuito embarcado), o módulo AD9850, o circuito condicionador de sinal e detector de pico e, finalmente, o sistema-teste sob análise de resposta a frequência, conforme apresentado na Figura 3:

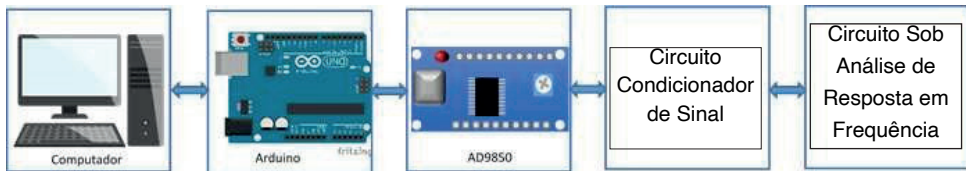


Figura 3. Diagrama em blocos da arquitetura do Bode Plotter.

No primeiro bloco têm-se a representação de um computador. Este é responsável por mostrar o diagrama de Bode por meio da interface gráfica em *Python*, bem como é utilizado para alimentar os outros blocos e programar o Arduino.

O segundo bloco, o Arduino, é plataforma eletrônica utilizada para controlar o módulo AD9850 fazendo a varredura de frequência. Para ele, foram desenvolvidos códigos-fonte que suprem as funções necessárias para o desenvolvimento do Bode Plotter.

No terceiro bloco está o módulo DDS AD9850 cuja principal função é a geração de ondas senoidais, com varredura de frequência. Ele é capaz de gerar ondas de forma precisa com frequência desejada a qual pode ser programada via código-fonte em Arduino.

O quarto bloco, o circuito condicionador de sinal da Figura 4 tem como objetivo fornecer potência ao sinal gerado pelo módulo AD9850 de modo que tal sinal possa ser aplicado à entrada de circuitos-teste e manter as suas características de amplitude e frequência. O esquemático apresentado na Figura 4 foi desenvolvido utilizando o *software* KiCad (KICAD, 2022).

O Condicionador de Sinal

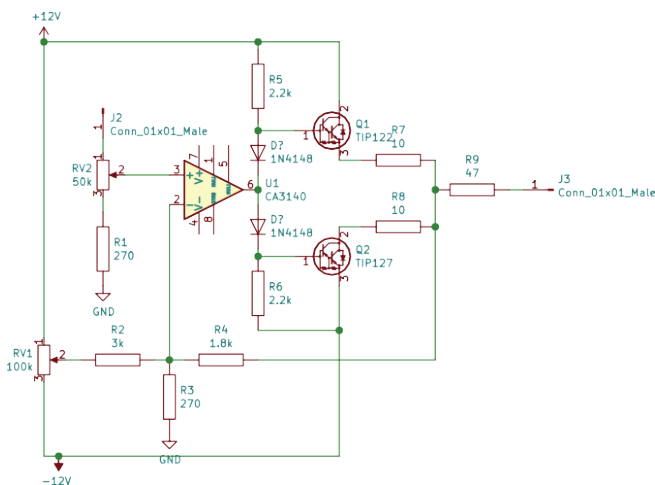


Figura 4. Circuito condicionador de sinal (esquemático desenvolvido em KiCad (KICAD, 2022)).

O circuito condicionador de sinal desempenha a função de amplificar e fornecer potência ao sinal senoidal gerado na saída do módulo AD9850. Desse modo, tal circuito permite que o sinal gerado pelo AD9850 possa ser aplicado à entrada dos circuitos-teste, isto é, os circuitos para os quais se deseja obter o Diagrama de Bode.

O quinto bloco é parte que será analisada pelo diagrama. Informando de modo contínuo a resposta as diversas frequências que serão colocadas na entrada do circuito. A Figura 5 apresenta a imagem da placa do circuito condicionador de sinal.

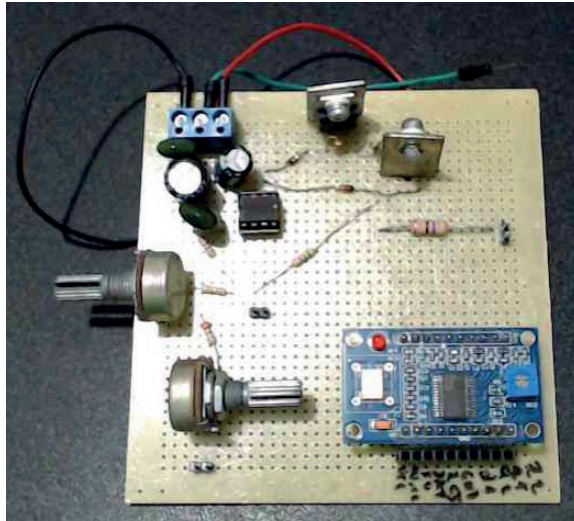


Figura 5. Placa do Circuito Condicionador de Sinal

Circuito Detector de Pico

A principal função desse circuito é gerar e manter um sinal CC igual ao pico de um sinal recebido. Desse modo, caso entre uma onda com oscilações e atinja 3 volts de tensão de pico, esse será o valor mantido na saída deste circuito. Na Figura 6 são apresentados dois circuitos detectores de pico utilizando o amplificador operacional TL082.

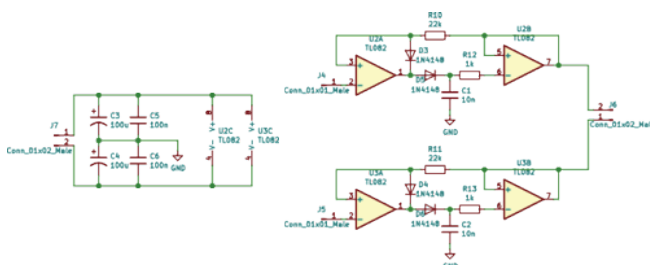


Figura 6. Circuito detector de pico (esquemático desenvol-vido em KiCad (KICAD, 2022)).

A utilização da arquitetura com dois detectores de pico no circuito da Figura 6 se deve à necessidade de medição simultânea da amplitude de entrada e também da amplitude de saída dos sinais senoidais referentes ao circuito-teste, isto é, o diagrama de Bode de magnitude corresponde a um gráfico que apresenta a razão entre a amplitude de saída e a amplitude de entrada para cada frequência de sinal senoidal aplicado ao circuito-teste. A Figura 7 apresenta a imagem da placa do circuito detector de pico confeccionada para utilização no protótipo do Bode Plotter.

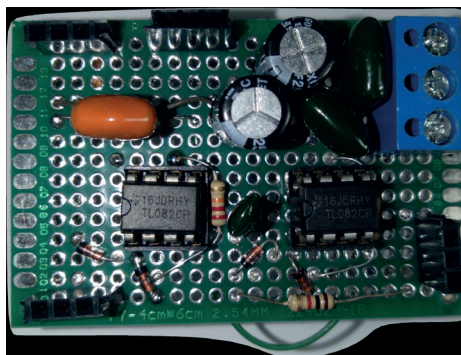


Figura 7. Placa do circuito detector de pico.

INTERFACE DE COMUNICAÇÃO ENTRE ARDUINO E PYTHON

Conforme a proposta definida para o projeto, o Bode Plotter é um equipamento auxiliado por computador, isto é, a interface gráfica de usuário (GUI) foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação *Python*. Esta interface, como será apresentado na seção 6, possui recursos de configuração de comunicação com Arduino, recurso de exibição gráfica do diagrama de Bode de magnitude prático para o sistema dinâmico em análise, bem como recurso para gravação dos dados experimentais de frequência e amplitudes dos sinais senoidais de entrada e saída. Para o projeto foi escolhido o Tkinter, o qual é uma biblioteca que acompanha a instalação padrão em dispositivos com *software* da microsoft, bastando apenas sua importação durante a construção do programa e possui diversos recursos para o desenvolvimento da interface.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os principais resultados obtidos a partir do desenvolvimento do protótipo final do Bode Plotter. Entre esses resultados estão a interface (GUI) desenvolvida em *Python*, conexões das placas de circuito que compõe a plataforma eletrônica física do Bode Plotter, bem como o processo de comunicação com a plataforma virtual/interface desenvolvida. Por fim, são apresentados os resultados de testes realizados em dois sistemas dinâmicos práticos: um circuito RC série e um circuito com topologia rede T, constituído de dois resistores e dois capacitores.

Interface Gráfica em Python - Bode Plotter Soft

Na Figura 8 é apresentada a interface gráfica desenvolvida em *Python* para a comunicação com Arduino e exibição do diagrama de Bode de magnitude. Pode-se observar a presença de dois menus: Arquivo, o qual gravar os dados de frequência e magnitude após a realização do experimento como também sair da aplicação; e um menu de Ajuda. A interface permite atribuir alguns parâmetros de comunicação, adicionar descrição do sistema, apresentando também uma barra de progresso que permite ao usuário acompanhar o avanço da varredura de frequência.

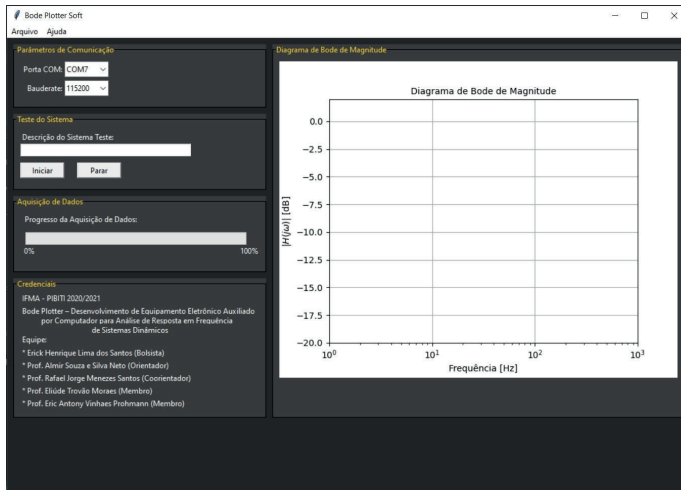


Figura 8. Plataforma Virtual desenvolvida em *Python* para traçado do diagrama de Bode de magnitude.

A Plataforma Eletrônica do Bode Plotter

Na Figura 9 é apresentada uma foto com a estrutura física do Bode Plotter:

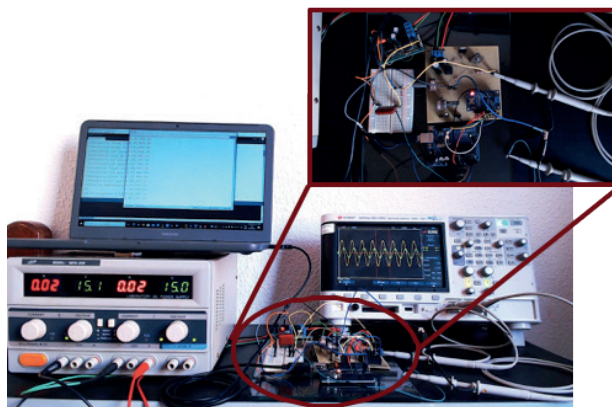


Figura 9. Plataforma Eletrônica completa do Bode Plotter para traçado do diagrama de Bode de magnitude.

Na Figura 9 são destacados os principais circuitos (placa Arduino, módulo AD9850, condicionador de sinal e detectores de pico), computador como a interface implementada em *Python* para comunicação e traçado do diagrama de Bode de magnitude, fonte de alimentação de bancada e adicionalmente utilizou-se um osciloscópio para visualização da varredura de frequência durante os experimentos realizados. Observe que o circuito-teste (um circuito RC série) encontra-se em uma placa *protoboard*.

A seguir, serão apresentados os resultados dos testes em duas topologias de circuito, para verificação do desempenho do Bode Plotter.

Sistema-Teste 1: Circuito RC Série

Considere como exemplo de sistema-teste, o circuito RC série representado na Figura 10:

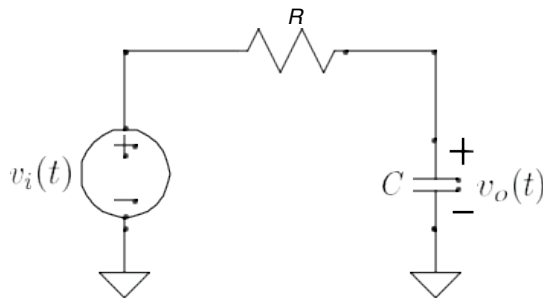


Figura 10. Circuito RC série.

Esta topologia de circuito tem característica de filtro passa-baixas. A função de transferência para o circuito é dada por:

$$H(s) = \frac{v_o(t)}{v_i(t)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (12)$$

Substituindo s por $j\omega$ em (12), têm-se:

$$H(j\omega) = \frac{1}{j\omega RC + 1} \quad (13)$$

onde $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência do sinal senoidal de entrada aplicado ao circuito RC. A magnitude ou módulo da função $H(j\omega)$ é dada por:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (14)$$

A função de magnitude em (14) permite a construção do gráfico de $|H(j\omega)|$ em função de ω ou mesmo de f , isto é, o traçado do diagrama de Bode de magnitude. Considerando a análise do circuito RC série apresentado, o mesmo foi submetido como sistema-teste ao Bode Plotter, com os seguintes valores de componentes, indicados na Tabela 1:

Componente	Valor Nominal	Valor Medido
Resistor (R)	1 k Ω	987 Ω
Capacitor (C)	1 μ F	1.024 μ F

Tabela 1. Especificação dos componentes do circuito RC série

Na Figura 11 é apresentada a tela referente ao experimento com o circuito RC série. Observa-se inicialmente, pelo gráfico apresentado no Bode Plotter Soft, na Figura 11, que a característica obtida para o circuito RC série prático foi de fato passa-baixas. A faixa de frequência considerada para o experimento foi de 1 Hz a 1 kHz. Todavia, para a validação do resultado obtido, fez-se um comparativo do diagrama de Bode de magnitude prático com o diagrama de Bode de magnitude a partir do modelo de função de resposta em frequência dado em (14). Como resultado foram obtidos os gráficos da Figura 12, onde se pode observar uma proximidade satisfatória até a faixa próxima à frequência de corte e um certo desvio para frequências mais elevadas.

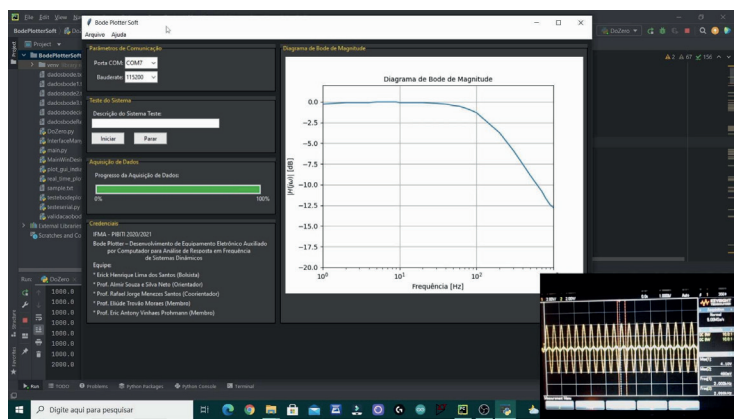


Figura 11. Captura de tela do Bode Plotter aplicado ao circuito RC série.

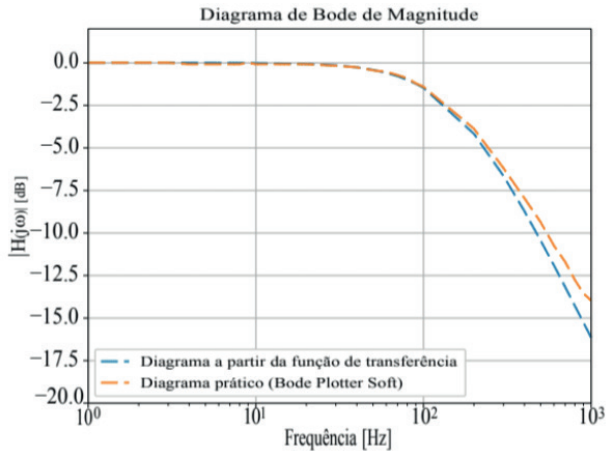


Figura 12. Comparativo entre os diagramas de Bode de magnitude para o circuito RC série a partir do Bode Plotter (linha tracejada) e a partir da função de transferência (linha traço e ponto).

Sistema-Teste 2: Rede T

Considere como segundo exemplo de aplicação do Bode Plotter, o circuito com a chamada topologia rede T representado na Figura 13. Esta topologia de circuito tem característica de filtro rejeita-faixa, também conhecido como *notch*. A função de transferência para o circuito é dada por Ogata (2003):

$$H(s) = \frac{v_o(t)}{v_i(t)} = \frac{R^2 C_1 C_2 s^2 + 2RC_2 s + 1}{R^2 C_1 C_2 s^2 + (2RC_2 + RC_1)s + 1} \quad (15)$$

Similarmente ao circuito RC, a rede T foi submetida como circuito-teste ao Bode Plotter.

Os valores de componentes utilizados na implementação do circuito são apresentados na Tabela 2.

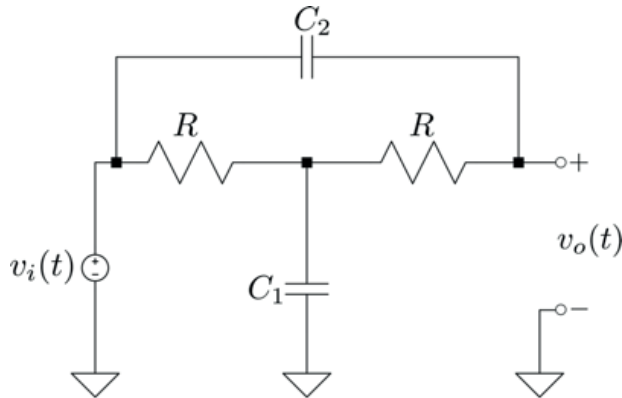


Figura 13. Rede T com capacitores e resistores. Adaptado de Ogata (2003).

Componente	Valor Nominal	Valor Medido
Resistor (R)	1 k Ω	987 Ω
Capacitor (C_1)	1 μ F	1.024 μ F
Capacitor (C_2)	220 nF	219.9 nF

Tabela 2. Especificação dos componentes da rede T

Na Figura 14 é apresentada a tela referente ao experimento com a rede T:

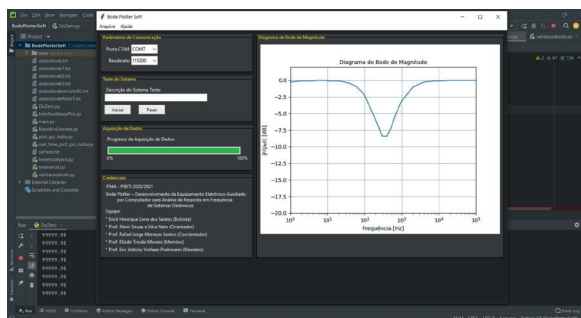


Figura 14. Captura de tela do Bode Plotter aplicado à rede T.

Observa-se inicialmente, pelo gráfico apresentado no Bode Plotter Soft, na Figura 14, que a característica obtida para a rede T prática foi de fato rejeita-faixa. O experimento foi realizado para uma faixa de frequência de 1 Hz a 100 kHz. Uma informação importante é que a interface do Bode Plotter Soft incorpora uma função para salvar os dados de frequência e magnitude após o término do experimento (menu Arquivo). Assim, tanto no caso do circuito RC série quanto no caso da rede T, esse dados foram utilizado para alimentar um *script* em *Python* para validação dos resultados. Assim, fez-se um comparativo

do diagrama de Bode de magnitude prático com o diagrama de Bode de magnitude a partir do modelo de função de resposta em frequência dado em (15). Desse modo, os gráficos da Figura 15 foram obtidos como resultado de comparação entre o modelo de função de transferência para a rede T e o traçado experimental a partir do Bode Plotter. Observa-se uma proximidade satisfatória nas faixas de passagem de frequência e um certo desvio para frequências na faixa de rejeição.

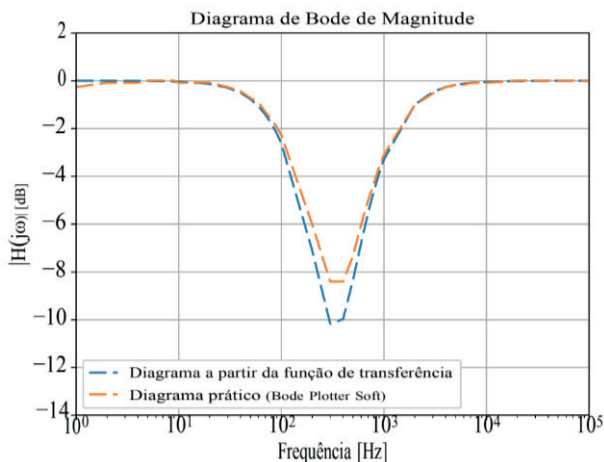


Figura 15. Comparativo entre os diagramas de Bode de magnitude para a rede T a partir do Bode Plotter (linha tracejada) e a partir da função de transferência (linha traço e ponto).

Considerando os resultados obtidos nos exemplos apresentados, observa-se um desempenho satisfatório do Bode Plotter desenvolvido. A interface desenvolvida em *Python* possui vantagens como permitir a aquisição dos dados de resposta em frequência para uso posterior.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a proposta de um equipamento eletrônico para traçado prático dos diagramas de Bode de magnitude (Bode Plotter). Como inicialmente proposto, foi desenvolvida a interface em *Python* (*Bode Plotter Soft*), responsável pela plotagem da curva do diagrama de Bode de magnitude bem como pela aquisição dos dados. Tal interface interage com a plataforma eletrônica responsável pela aplicação dos sinais senoidais e aquisição das informações de amplitude de entrada e saída para cada frequência aplicada. Os circuitos-teste utilizados para a verificação do desempenho da plataforma proposta permitiram a validação da proposta em diferentes regiões de frequência e características de filtragem. Como propostas futuras relativas a este projeto, têm-se a construção de uma placa de circuito impresso (PCB) única para toda a plataforma eletrônica, construção de um case para o protótipo e extensão da ferramenta para a plotagem do diagrama de Bode de fase.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA) pelo apoio e fomento a este projeto.

REFERÊNCIAS

ARDUINO (2018). What is arduino? URL <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.

Banzi, M. (2009). *Getting Started with Arduino*. O'Reilly Media.

Bode, H.W. (1945). *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. D. Van Nostrand Co.

Boyce, W.E., DiPrima, R.C., and Meade, D.B. (2020). *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*, volume 11 ed. LTC.

Castrucci, P.L., BITTAR, A., and SALES, M. (2018). *Controle Automático*. 2a ed. LTC.

Dyke, P.P.G. (1999). *An Introduction to Laplace Transforms and Fourier Series*. Springer-Verlag, London.

Horowitz, P. and Hill, W. (2017). *A Arte da Eletrônica: Circuitos Eletrônicos e Microeletrônica*, volume 3 ed. Bookman.

KICAD (2022). Kicad EDA – a cross platform and open source electronics design automation suite. URL <https://www.kicad.org/>.

MacFarlane, A. (1979). The development of frequency- response methods in automatic control [perspectives]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(2), 250–265. doi:10.1109/TAC.1979.1101978.

Marshall, S.A. (1978). *Introduction to control theory*. Macmillan, London.

Nyquist, H. (1932). Regeneration theory. *The Bell System Technical Journal*, 11(1), 126–147. doi: 10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x.

Ogata, K. (2003). *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall, São Paulo.

MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE: Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Paranaense (2009-2013), com especialização em Gestão de Projetos e Obras de Edificações pela Universidade Estadual de Maringá (2014-2016). Obteve seu Mestrado em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá (2014-2016) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (2018-2023). Atuou como Professora horista na Universidade Paranaense nas áreas de Engenharia Civil e Arquitetura entre os anos de 2017-2022, bem como contribuía e participava do quadro do colegiado do curso. Atualmente (2021- Atual) é professora do Departamento de Tecnologia (DTC) nos cursos de Engenharia Civil e Tecnologia da Construção civil da Universidade Estadual de Maringá Campus de Umuarama, lecionando disciplinas de Conforto térmico, Hidrologia, Hidráulica I, Laboratório de Hidráulica I e II, Materiais de Construção, Gerenciamento de Obras, entre outras.

Participa efetivamente em orientações de TFC bem como em orientações de estágio supervisionado e obrigatório.

A

Análise de falhas 59

Antiestática 27

Arduino 40, 41, 42, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 57

B

Bode plotter 40, 41, 42, 45, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56

Bomba mecânica 59

C

Condutividade elétrica 27

D

Demanda 3, 6, 7

Desempenho 27, 41, 42, 47, 52, 56

E

Eficiência 25

Equipamento eletrônico 40, 56

F

Fluxo contínuo 59

Fontes renováveis 59

Frequência 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 55, 56

G

Gestão da qualidade 59

I

Insumos 2

Inventários 59

M

Materiais híbridos 59

Melhoramento 59

Melhoria contínua 59

Modificador de impacto 27

N

Nanocompósitos 27, 30

Nanotubos de carbono 27

Nível de inventários 59

P

Poços Onshore 59

Poli (ácido láctico) 25, 27

Polímeros 37, 38

Processos 41, 43

Produtividade 59

Programação 45, 46, 47, 50

Propriedades elétricas 59

Propriedades mecânicas 59

Propriedades térmicas 59

R

Redução de custo 59

S

Sinais senoidais 42, 43, 45, 47, 50, 56

Sistema linear 59

Sistemas operacionais 46, 59



Sistemas produtivos 59

T

Tensão 45, 46, 49

ENGINEERING

QUALITY, PRODUCTIVITY AND
TECHNOLOGICAL INNOVATION

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

ENGINEERING

QUALITY, PRODUCTIVITY AND
TECHNOLOGICAL INNOVATION

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