



ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XII



EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

12^a ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

12ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2023

155 f.: il

DOI: 10.37423/2023.edcl659

ISBN: 978-65-5367-264-2

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2023.edcl659>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Wesley Pacheco Calixto

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

MSc Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

CAPÍTULO 1	6
SIMULATION ANALYSIS AND EVALUATION OF FERMENTATION TEMPERATURE IN AN IN SITU GAS STRIPPING FERMENTATION PROCESS	
Gustavo Henrique Santos Flores Ponce	
Júlio Cesar de Carvalho Miranda	
Moisés Alves	
Maria Regina Wolf Maciel	
Rubens Maciel Filho	
DOI 10.37423/230107070	
 CAPÍTULO 2	 17
APLICAÇÃO DE MACHINE LEARNING E DESCRITORES ESTATÍSTICOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS	
Luiz Alberto Pinto	
Lucas de Oliveira Soares	
Diego Assereuy Lobão	
DOI 10.37423/230107080	
 CAPÍTULO 3	 37
TESTE DE ACEITAÇÃO SENSORIAL DE LICORES DE BAIXA CALORIA COM POLPA DE MAROLO (ANONA CRASSIFLORA)	
OLGA LUCIA MONDRAGÓN-BERNAL	
JOSÉ GUILHERME LEMBI FERREIRA ALVES	
DOI 10.37423/230107099	
 CAPÍTULO 4	 47
EFEITO SINÉRGICO ENTRE A PRECIPITAÇÃO ELETROSTÁTICA E A FILTRAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS	
Bruno José Chiaramonte de Castro	
Camila Raquel de Lacerda	
Bruna Râmela de Melo	
Rafael Sartim	
Mônica Lopes Aguiar	
DOI 10.37423/230107102	
 CAPÍTULO 5	 61
SENSIBILIZAÇÃO DO USO RACIONAL DA ÁGUA NOS MUNICÍPIOS DE ATALAIA DO NORTE, BENJAMIN CONSTANT E TABATINGA NO ESTADO DO AMAZONAS	
José Francisco Aleixo da Silva	
Breno Souza de Oliveira	
DOI 10.37423/230107107	

CAPÍTULO 6	77
CARACTERIZAÇÃO DE FILMES DE SERICINA MODIFICADOS COM POLIETILENOGLICOL	
Ana Paula Sone	
Joel Cordeiro Júnior	
Maicon Felipe Malacarne	
Gabriel Dequigiovanni	
Marcelino Luís Gimenes	
Viviane Vanessa Dohl Feiten	
DOI 10.37423/230107139	
CAPÍTULO 7	87
PRODUTIVIDADE DO PIMENTÃO VERMELHO EM FUNÇÃO DE L MINAS DE IRRIGAÇÃO E TIPOS DE ADUBAÇÕES	
Mateus Batista Granja	
Caciana Cavalcanti Costa	
João Batista Dos Santos	
Marinês Pereira Bomfim	
Laíza Gomes de Paiva	
Denise Campos Nunes de Farias	
DOI 10.37423/230207182	
CAPÍTULO 8	108
IDENTIFICAÇÃO DE UM MODELO PARAMÉTRICO NÃO LINEAR PARA SINTONIA DO CONTROLADOR DE VELOCIDADE NA ESTRUTURA DE CONTROLE VETORIAL INDIRETO DE UM MIT	
Renato Santana Ribeiro Junior	
Eubis Pereira Machado	
Manoel de Oliveira Santos Sobrinho	
DOI 10.37423/230207193	
CAPÍTULO 9	126
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA RODOVIA BRASILEIRA 242/MT, POR MEIO DE ÍNDICES QUALITATIVOS	
Gersina Nobre da Rocha Carmo Junior	
Julyane Cruz Souza	
DOI 10.37423/230207194	

Capítulo 1



10.37423/230107070

SIMULATION ANALYSIS AND EVALUATION OF FERMENTATION TEMPERATURE IN AN IN SITU GAS STRIPPING FERMENTATION PROCESS

Gustavo Henrique Santos Flores Ponce

Instituto Federal de Santa Catarina

Júlio Cesar de Carvalho Miranda

Universidade Federal do Mato Grosso

Moisés Alves

Universidade Estadual de Campinas

Maria Regina Wolf Maciel

Universidade Estadual de Campinas

Rubens Maciel Filho

Universidade Estadual de Campinas



Resumo- Fermentation is the main step in bioethanol production. The major fermentation problems are the yeast inhibition when high ethanol concentrations are reached, and the high amounts of water added to the process. One way to overcome these problems is to couple fermentation to a continuous process removal, or known as *in situ* removal techniques. Such techniques allow the use of high sugar concentrations in the broth, keeping ethanol concentration in acceptable ranges to microorganism metabolism. Gas stripping *in situ* removal presents itself as a simple technique that requires no membrane or expensive chemicals and easy to integrate with fermentation process. In this work, the simulation of a gas stripping fermentation process was carried out using ASPEN PLUS® V.7.3, in order to evaluate the ethanol separation process behavior related to different fermentation temperatures. Initially a case study was performed, where a concentrate sugar stream at 30% wt was fed to a reactor operating at a temperature of 34°C with 7 L/min of CO₂ gas flow rate. In this simulation, 67 % of ethanol was stripped which allowed ethanol concentration to be kept below threshold of toxicity. The results shown that high ethanol recoveries were reached as high as the temperature employed. Nonetheless, the temperature range studied was limited by the *S. cerevisiae* yeast behavior, so, in practice, only narrow temperature ranges could be applied for gas stripping fermentation process.

1. INTRODUCTION

Biofuels have been presented as an important option for energy supply, notably as renewable substitutes for fossil fuels. They are considered a renewable and endless resource, since they are produced from biomass, usually from agricultural crop. Among all Biomass fuels currently in production, ethanol from sugar cane is the most commercially successful, has a positive energy balance and has been benefited from the support of government policies (Pereira e Ortega, 2010; Goldberg, 2009). Driven by government support, Brazil and U.S. are the dominant industrial players, accounting for 87% of global biofuel production. Brazil is now the biggest exporter and the second biggest fuel ethanol world producer with around 30 billion liters/annum (2008) (Bjapai, 2013).

The ethanol production on a large scale in Brazil takes place via the fermentation step, in this step the sugars presents in the fermentation broth are converted into ethanol due specific metabolic paths performed by *Sacchamoryces cerevisiae* yeast. Such microorganism usually can not tolerate more than about 10-12% by volume of ethanol in the broth, thus, it is necessary to start the fermentation with a relatively dilute sugar solution, usually not more than about 16% by weight, in order to achieve complete conversion in a reasonable time. In this way, sugarcane molasses (about 52% by weight of sugar) which is the main sugar raw material of fermentation, have to be diluted (conditioned). Costs associated with distillation, centrifugation and evaporation can be minimized by reducing this amount of water that is added to the process, besides, large process equipment would not be necessary (Taylor et al, 1995; 2010).

Aiming to solve such problems, several techniques were proposed for simultaneous fermentation and product recovery from fermentation broth. Since volatile products could be removed, the toxicity effects of solvents are eliminated, enhancing sugar utilization concentration, which in turns, results in lesser water added in the fermentation step. The gas stripping *in situ* removal process is a simple technique that requires no membrane and expensive chemicals, is free of emulsion formation, has low energy requirement and easy to integrate with fermentation process (Vrije et al., 2013; Ezeji et al, 2012; Yang et al, 2013).

Gas stripping technique is based on passing a carrier gas (such as CO₂ or N₂) through a sparger, resulting in the formation of gas bubbles in the bioreactor. Gas sparging induces ethanol vapourization, which after passing through a condenser is recovered by condensation. The carrier gas is then purged or recycled back to the reactor and used to recover more ethanol from the fermentation broth (Durre et al, 2013).

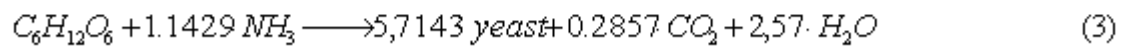
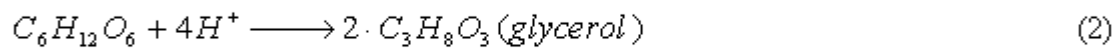
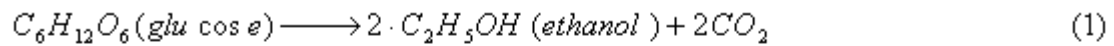
Several variables can play a significant role in gas stripping technique such as: gas flow rate, condensation temperature, system agitation, bubble size, broth viscosity, fermentation temperature and different kinds of gases utilized. The fermentation temperature represents a critical step in ethanol production, it directly influences in ethanol recovery by gas stripping and metabolic activity of microorganisms. Higher temperatures make many process parameters, including the stripping factor more favorable for fermentation. The ratio of ethanol to inert gas is a strong function of the stripping temperature because the partial pressure of a volatile compound (ethanol or water) in the gas phase is determined, among other factors, by saturated vapor pressure, which raises as temperature increases (Vane, 2008). Besides, higher temperatures can decrease density, surface tension and viscosity on fermentation broth, increasing the solubility of most substrates (Liu and Hsu, 1990). In the other hand, higher temperatures can negatively impact in biomass production and yeast behavior, diminishing the ethanol content in the final wine (Dias et al, 2009).

The objective of this work was to investigate how different fermentation temperatures may influence the gas stripping fermentation process performance, searching for high percentual of ethanol recovery, keeping the ethanol concentration lower than threshold of toxicity. For this reason, process simulations were carried out employing ASPEN PLUS® V.7.3 software, in laboratory scale ranges. Sensibility analysis were performed being a significant tool for recognize variable impacts in the final results, helping the outline laboratory scale trials in order to find the best applicable temperatures ranges.

2. SIMULATION DEVELOPMENT OF *IN SITU* GAS STRIPPING

The fermentation process simulation with *in situ* gas stripping was carried out employing the ASPEN PLUS® V.7.3. A conversion reactor (fermentor) was used in the simulation to convert the broth sugars, continuously. During the fermentation reactions, sucrose (from sugarcane) is hydrolyzed into fructose and glucose (by microorganisms), which are converted into carbon dioxide (CO_2) and ethanol (Reaction 1). The raw material used industrially and in laboratory scale is the sugarcane molasses, however a simulation approach was made to molasses being only glucose and water. Some by-products are also formed in fermentation step, as a result of parallel fermentation reactions, cell growth and impurities in the sugar juice, among other factors. In addition, around 4% of the glucose is not consumed by the yeast (Dias et al., 2009).

The extend of fermentation conversion is set according to industrial data of large scale units. Glucose utilization is 94,63 %, with 1,37 % glucose converted to yeast cells. The ethanol, glycerol, succinic acid, and isoamilic alcohol yields are 0,9048, 0,0267, 0,0029, 0,0119 and $3,1 \times 10^{-6}$ g/(g glucose), respectively (Dias et al., 2009). Major reaction involved in the glucose fermentation include following:



The yeast compound was created as a solid type in ASPEN PLUS®, in order to represent cell growth reaction (Reaction 3). The gas stripping process is simulated by a flash drum at the same fermentor conditions once stripping is not available at conversion reactor block. Thus, the thermodynamic equilibrium in the conversion reactor is carried out using a flash drum (flash separator type). The fermentation with in situ gas stripping process flow sheet is presented in the Figure 1.

Sequentially, a concentrate sugars stream is fed in reactor (I1), after conversion of sugars this stream follows to the flash drum, for separation step. The bottoms flash drum stream (B1) contains, basically, all glucose components converted and not converted. This stream is then centrifuged, in order to separate biomass from the main broth. Almost all biomass stream (R5) returns to the conversion reactor and the surplus biomass is purged out of the system, likewise happens with the broth stream (R1) where a small part of its flow leaves the process and the most part of it is recycled for keep the system mass balance.

The top flash drum product contains, in its majority, stripped gas and ethanol/water vapour. This stream is condensed and the vapour stream (partially exhausted in volatile compounds) is recycled back to the flash drum. The condenser is simulated as a heat exchanger followed by a flash drum (FB2) at the same heat exchanger conditions. With flash drum insertion, it was employed the same thermodynamic approach done before (fermentor), in order to become easier the phase separation.

A small amount of the gas flow rate (T3) is purged out from the system (about 5%). The main top flash stream (T3) is recycled by a peristaltic pump which acts raising the pressure of gas stream (R4). The amount of carbon dioxide produced during fermentation is not the same amount of gas bled out of the process (P1), thus, small amounts of additional stripping gas are required in this case.

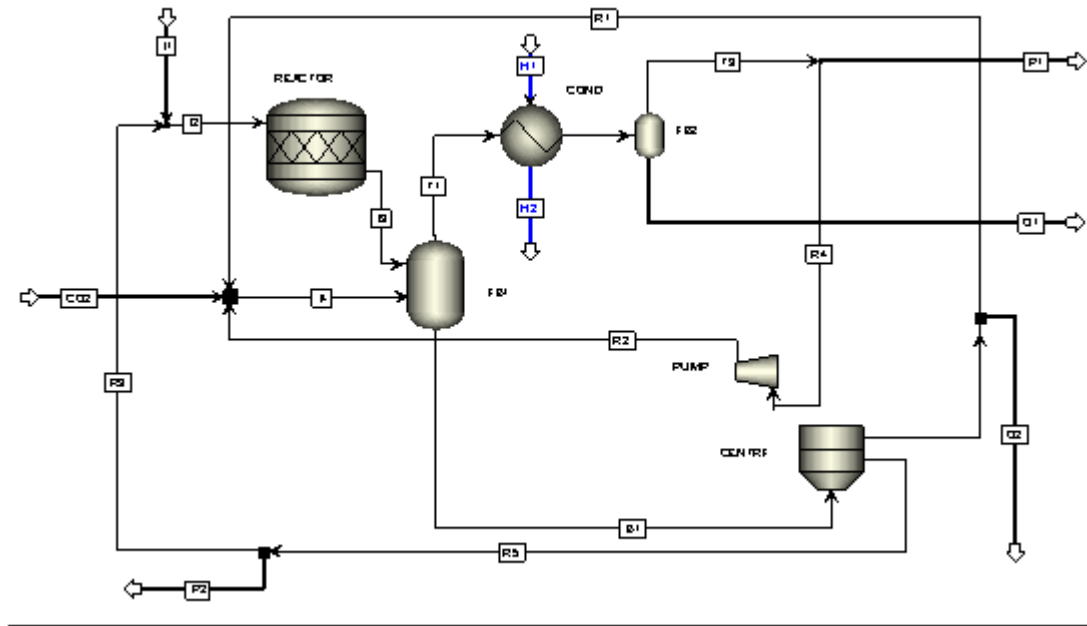


Figure 1- Flowsheet of continuous fermentation process with *in situ* gas stripping carried out in ASPEN PLUS®. Wider Lines indicate the process streams boundaries.

2.1 THERMODYNAMIC MODEL

To calculation of the activity coefficient on the liquid phase, the NRTL (non-random two-liquid) model was used. In the same way, to calculate non idealities of the vapour phase, the Hayden-O'Connell model was used (NRTL-HOC). According to Dias et al. (2009), NRTL model provides the best estimations for the boiling temperature of sucrose solutions, when compared either UNIQUAC or equation of state Peng-Robinson. The Hayden-O'Connell equation was used because it can predict dimerization in the vapour phase on mixtures containing carboxylic acids (acetic acid).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Initially, a simulation case study was carried out according conventional values of process variables, respecting the laboratory applicable ranges. Thereby, the gas stripping fermentation process was conducted continuously with 7 L/min of CO₂ gas flow rate at -2 °C of cooling temperature and 30 wt% of glucose concentration in feed. The CO₂ was used as a carrier gas, mostly because it is already produced in fermentation, besides no inhibitory effect is attributable to its use. For this case of study, the fermentation temperature was set as 34°C. The main streams and components results are shown in Table 1, as follows:

Table 1: Stream values of the case study

Stream ID	I1	I3	I4	T1	B1	O1	T3	R2
Stream	Main Feed	Reactor output	Flash Feed	Stripped Gas	Stripped Broth	Cond.	Main Output	Gas Recycled
Temperature (K)	307,2	307,2	301,3	307,2	307,1	271,1	271,1	272,0
Vapor Fraction	0,000	0,073	0,133	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000
Mass Flow (Kg/hr)	0,099	0,100	2,991	0,780	0,060	0,026	0,032	0,723
Volume (L/min)	0,001	0,139	7,252	7,658	0,001	0,000	0,266	6,031
Mass Fraction								
Glucose	0,300	0,012	0,015	0,000	0,020	0,000	0,000	0,000
Water	0,690	0,695	0,665	0,022	0,884	0,603	0,002	0,002
Ethanol	0,000	0,139	0,056	0,017	0,073	0,360	0,005	0,005
Glycerol	0,000	0,008	0,010	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000
Acetic Acid	0,000	0,002	0,003	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
CO ₂	0,000	0,134	0,247	0,959	0,001	0,011	0,992	0,992

Analysing the results presented in Table 1 was possible to notice a high ethanol concentration leaving the fermentor (I3 stream), with about 21°GL in ethanol (166 g/L or 13,9 % wt). Due to gas stripping technique, the broth final ethanol concentration may reach 7,3 % wt (about 9 °GL). As it could be seen, this ethanol decrease in the broth didn't reach the microorganism (*Saccharomyces cerevisiae*) threshold of toxicity, which is about 10-12% by volume of ethanol (Taylor, 1995).

Specifically using 34°C of fermentation temperature and -2 °C of condensation temperature (FB2 temperature), was also noted that 67% of produced ethanol (on stream I3) was recovered in the condensate stream (O1 stream), being the condenser efficiency for ethanol compound about 70%. The selectivity of the process was calculated as well (defined as $S = (y_{\text{ethanol}}/y_{\text{water}})/(x_{\text{ethanol}}/x_{\text{water}})$), it was reached a value of 7,2 (ethanol over water).

Performing the fermentation temperature sensitivity analysis (considering theoretical conversions independent of the temperatures effects in the microorganisms), keeping the other specifications as assigned before (30% wt of sugars concentration in feed, 7 L/min of CO₂ permanent gas flow rate and -2°C of cooling temperature), a profile of gas stripped percentual and its concentration in the condensate was provided varying the fermentation temperature. The results of this analysis are shown in Figure 2.

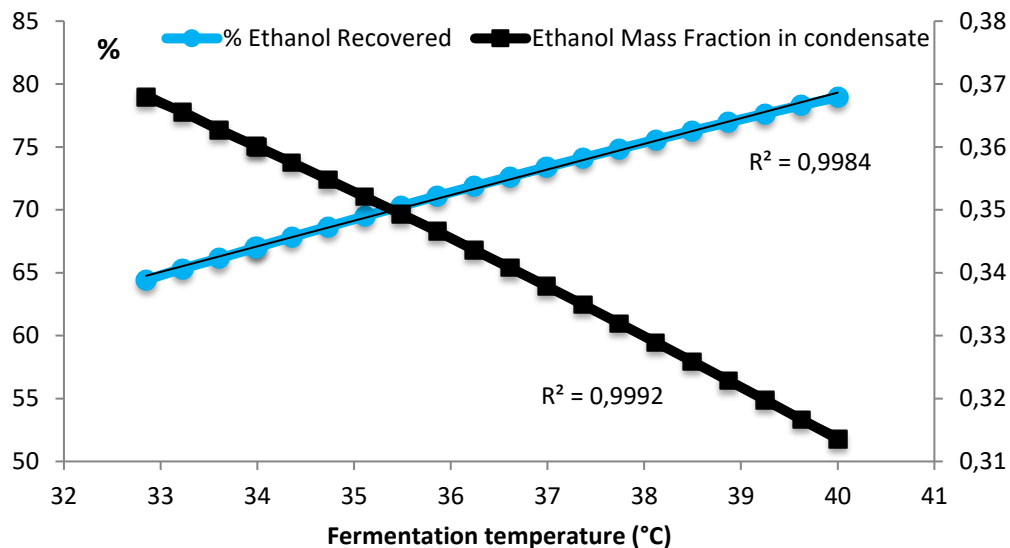


Figure 2- Relationship between the fermentation temperature towards percentage of recovered ethanol and its concentration in the condensate.

From the chart, it became clear that the variable effects follow opposite linear trends as fermentation temperature ranging. For instance, at the fermentation temperature of 38°C about 75% of ethanol is recovered from the broth. As the fermentation temperatures increases, the amount of ethanol stripped raises. On the other hand, the condensate concentration decreases as reactor temperature increases. This occur mainly because more water is stripped as reactor temperature is raised and the heat of condensation of water per unit mass is 2.7 times that of ethanol, thus much more water is condensed over ethanol (Vane, 2008). The ethanol concentration in the condensate portrays the energy consumption in the overall ethanol production process. Low concentrations in condensate raises the energy required in the end-of-pipe process (distillation process), considering to produce ethanol in commercials concentrations (Hydrated Ethanol).

Again, higher temperatures result in higher ethanol stripped amount from the broth, but usually temperatures above 35 °C are not used for experimental and industrial purposes. According to Philapasong et al (2005), higher fermentation temperatures cause inhibition effect on cell growth of *Saccharomyces cerevisiae*, changing saturation level of soluble compounds and solvents in the cells, which might increase the accumulation of toxic concentration including ethanol inside cells. The same authors claim that a maximal level of biomass and ethanol production are seen among 30 °C e 33 °C, these levels decrease considerably at temperatures exceeding 35 °C.

As mentioned before, from 35 °C the yeast presents a huge ethanol production decay. The authors's experience and industrial applications suggest non use of temperatures beyond 35°C. Alternatively,

thermophilic microorganisms (other yeasts, filamentous fungi and bacteria) can be used to enable higher fermentation temperatures. Currently in Brazil, many attempts in this area are being performed, mainly to enable ethanol production of second generation (SSF process). However more studies in thermophilic microorganisms area are still necessary once several drawbacks still not allowed substitution of conventional *S. cerevisiae*.

Since ethanol concentration must to be kept lower than threshold of toxicity, also is essentially important evaluate how fermentation temperature affect the decrease of ethanol concentration in the broth. The Figure 3 presents this analysis carried out considering: 30% wt of sugars concentration in feed, 7 L/ min of CO₂ gas flow rate, -2 °C of cooling temperature and 90,48% of sugars conversion into ethanol on the reactor.

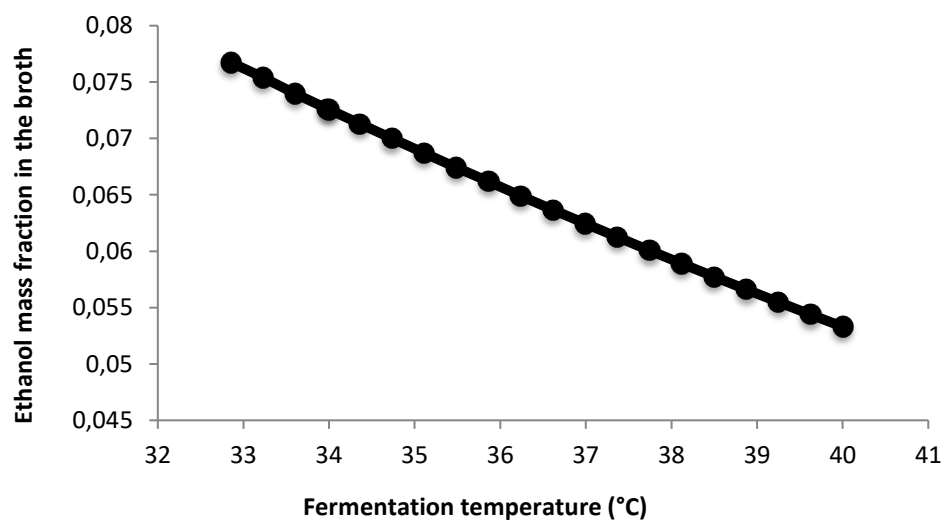


Figure 3- Ethanol concentration in the broth decreasing with the raise of fermentation temperature.

In Figure 3 it is shown that the raise of the fermentation temperature reduces the mass fraction of ethanol in the broth. Higher temperatures were more propitious in order to keep low ethanol concentrations. Nonetheless, within the concentrations ranges studied, the applicable microorganism fermentation temperatures (33-35 °C) are enough to decrease the ethanol concentration below of inhibition limits (10-12 ° GL ethanol concentration).

4. CONCLUSIONS

An *in situ* gas stripping fermentation process was performed through a case study considering high concentrate sugars feed. The results showed the effectiveness of the technique in stripping ethanol from the main broth, allowing maintain acceptable ethanol concentrations on it. Through sensitivity

analysis, it was could be seen that the fermentation temperature variable causes two ethanol production tradeoffs. The first one is the ethanol condensate concentration and the second one is the percentual of ethanol recovered (stripped ethanol) from the process, both, are inversely proportional in the raise of fermentation temperature.

Such impass was solved when microorganism behaviour was analized, once literature results shown that temperatures above 35 °C greatly diminishes ethanol and biomass production, this temperature value should be considered the limit of work. Taking into account the feed sugars concentration studied and all other the parameters of the process, the best temperature ranges that may be applied in the fermentation process of *in situ* gas stripping would be around 33-35 ° C.

5. REFERENCES

- BAJPAI, P. Advances in Bioethanol, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI: 10.1007/978-81-322-1584-4_7, The Authors 2013.
- DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S. A.; MACIEL, R. F.; ROSSELL, C. E.V.; WOLF, M. R. M. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol Process. Chem Eng Res Des, v. 87, p. 1206-1216, 2009.
- EZEJI, T. C.; QURESHI, N.; BLASCHEK, H. P. Microbial production of a biofuel (acetone-butanol-ethanol) in a continuous bioreactor: impact of bleed simultaneous product removal. Bioprocess Biosyst Eng., 2012, DOI 10.1007/S00449-012-0766-5.
- GOLDEMBERG, J. Biomassa e Energia Química Nova, vol. 32, nº3, 582-587, 2009.
- LIU, H., S., Hsu, H., W. Analysis of gas stripping during ethanol fermentation- I.A combined product-substrate inhibition case. Chemical Engineering Science. Vol. 46, p-2551-2565, 1990.
- PEREIRA, C. L. F.; ORTEGA, E. Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane. Journal of Cleaner Production, vol.18, pg. 77-82, 2010.
- PHISALAPHONG, M.; SRIRATTANA, N.; TANTHAPANICHAKOON, W. Mathematical modeling to investigate temperature effect on kinetic parameters of ethanol fermentation. Biochem. Eng. J., vol. 28, p.36-43, 2006.
- DURRE, P.; SCHIEL-BENGELSDORF, B.; MONTOYA, J.; LINDER, S. Butanol Fermentation. Envir. Technol., vol. 34, p. 1691-1710, 2013.
- TAYLOR, F.; KURANTZ, M. J.; GOLDBERG, N.; CRAIG JR., J. C. Continuous Fermentation and Stripping Ethanol. Biotechnol. Prog., vol. 11, 693-698, 1995.
- TAYLOR, F.; MARQUEZ, M. A.; JOHNSTON, D. B.; GOLDBERG, N. M.; HICKS, K. B. Continuous high-solids corn liquefaction and fermentation with stripping. Bioresource Technology, vol. 101, p. 4403-4408, 2010.
- VANE, L. M. Separation Technologies for the recovery and dehydration of alcohols from fermentation broths- Review. Biofuels. Bioprod. & Bioref., vol. 2, p. 553-588, 2008.
- VRIJE, T.; BUDDE, M.; VAN DER WAL, H.; MIRIAM, B.; CLAASSEN, A. M.; CONTRERAS, A. M. L. In situ removal of isopropanol, butanol and ethanol from fermentation broth by gas stripping. Biosource Technology, vol.137, p. 153-159, 2013.
- YANG, S. T.; LU, C. M. S.; DONG, J. Butanol production from wood pulping hydrolysate in an integrated fermentation gas-stripping process, Bioresource Technology, vol. 143, p. 467-475, 2013.

Capítulo 2



10.37423/230107080

APLICAÇÃO DE MACHINE LEARNING E DESCRITORES ESTATÍSTICOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

Luiz Alberto Pinto

Instituto Federal do Espírito Santo

Lucas de Oliveira Soares

Instituto Federal do Espírito Santo

Diego Assereuy Lobão

Instituto Federal do Espírito Santo



Resumo: Esse artigo faz uma análise do desempenho dos classificadores k-Nearest Neighbour, Support Vector Machine, Decision Tree e Random Forest, para a classificação de sinais de vibração adquiridos a partir de rolamentos normais e de rolamentos nos quais foram introduzidas falhas artificiais. Para a extração de descritores foram consideradas duas abordagens. A primeira utiliza Análise de Componente Principal (PCA) para extração das componentes principais dos sinais originais, que são utilizadas como descritores para a modelagem. A segunda obtém os modelos a partir de descritores estatísticos dos sinais no domínio do tempo. O conjunto de dados utilizados nos testes é o CWRU Bearing Dataset, e os resultados mostram que os descritores estatísticos apresentam boa separabilidade das classes favorecendo o desempenho dos modelos de classificação, que obtém taxas superiores a 99% de acurácia nos classificadores Arvore de Decisão e Floresta Aleatória.

Palavras-chaves: diagnóstico de falhas em rolamentos; reconhecimento de padrões; descritores estatísticos; extração de características; análise de componentes principais.

1.INTRODUÇÃO

Ambientes industriais são constituídos por diferentes tipos de equipamentos que fazem parte de sistemas de produção complexos. Entre os diversos tipos de equipamentos que operam nesses ambientes, um dos mais importantes e mais sujeitos a falhas são as máquinas rotativas. Dessa forma, a utilização de técnicas de manutenção eficientes são importantes para que esses equipamentos estejam sempre em condições de produção. As estratégias mais eficientes de manutenção, consistem no monitoramento automático contínuo das condições de funcionamento das máquinas rotativas, através da coleta e análise de sinais por eles produzidos quando em funcionamento. A implantação de tal estratégia em um ambiente industrial pode reduzir os custos das intervenções e os tempos de parada da produção.

A utilização de técnicas de monitoramento automático das condições de funcionamento de equipamentos através da análise dos sinais do processo, podem auxiliar na identificação, no diagnóstico e na eliminação das falhas em máquinas rotativas. Zhang et al. (2017), afirmam que modelos de diagnóstico de falhas baseados em métodos orientados a dados são vantajosos, pois podem fornecer diagnósticos precisos, mesmo sem o conhecimento do modelo do processo. Nesses métodos, os diagnósticos são elaborados a partir de dados que, de forma geral, são facilmente obtidos por sensores.

Devido a sua natureza dinâmica, quando em funcionamento as máquinas rotativas são submetidas a ação de forças centrífugas, forças de atrito e forças resultantes da vibração das partes móveis ou de folgas no conjunto. Devido a esse sistema de forças atuando sobre o equipamento, as partes móveis sofrem desgastes operacionais, que com o tempo podem resultar no aparecimento de falhas e em quebras intempestivas.

Nesse contexto, os mancais de rolamento se tornam as partes mais importantes das máquinas rotativas. Sob condições adequadas de operação e conservação os mancais de rolamento podem reduzir os efeitos das ações das referidas forças sobre o conjunto, prevenindo o aparecimento de alguns tipos de falhas. De acordo com Zhang et al. (2019), que investigou a probabilidade de ocorrência de falhas em máquinas rotativas, problemas em rolamentos são responsáveis por cerca de 30% a 40% de todas as falhas nessas máquinas. Como, geralmente, condições anormais de funcionamento de rolamentos se manifestam na forma de vibração, o monitoramento dessa variável é uma das principais ferramentas para acompanhamento das condições de funcionamento das máquinas.

Em função da relevância deste tema, constatamos que rolamentos são componentes básicos essenciais para uma máquina rotativa e isto motiva o estudo da detecção antecipada de problemas para que não haja impactos nos processos produtivos onde eles estão presentes. Com a crescente demanda de monitoramento e a grande quantidade de informações de dados de processos industriais, a utilização de aprendizagem de máquina está ganhando cada vez mais atenção pois, por meio destas técnicas, somos capazes de retirar informações úteis de dados históricos (Chen et al., 2019).

Este artigo aborda a utilização de técnicas de Machine Learning, K-Nearest Neighbour, Support Vector Machine, Decision Tree e Random Forest, para classificação de falhas extraídas de sinais de vibração produzidos por rolamentos de motores. O conjunto de dados utilizado é o da Case Western Reserve University - CWRU, disponível abertamente para estudos na área acadêmica. O objetivo é apresentar o desempenho destas ferramentas de classificação em função dos descritores extraídos do sinal vibracional e dos modos de operação do equipamento em função das cargas de trabalho.

Na sequência este trabalho está constituído pelas seguintes seções: a Seção 2 contém a revisão do estado da arte sobre diagnóstico de falhas; a Seção 3 apresenta uma descrição sucinta dos algoritmos de classificação empregados; a Seção 4 traz uma descrição das etapas executadas na realização da pesquisa; a Seção 5 reúne os resultados obtidos e a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas de diagnóstico têm como base a detecção e a classificação das condições anormais de funcionamento. Devido a sua importância no setor industrial, diversos pesquisadores têm se dedicado a estudar a aplicação de técnicas de Machine Learning a elaboração de diagnóstico de falhas em sistemas industriais.

Rauber et al. (2015) estudaram a classificação de sinais de vibração utilizando os algoritmos *k-Nearest Neighbors (k-NN)*, *Support Vector Machine (SVM)* e *Redes Neurais Artificiais Multilayer Perceptron (MLP)* para o diagnóstico de falhas em rolamentos. Nesse trabalho, são comparados os desempenhos dos classificadores quando implementados com a utilização de descritores obtidos com base em modelos estatísticos, Wavelet Package Analysis e análise complexa de envelope. Para a redução da dimensionalidade os autores utilizaram Análise de Componentes Principais - PCA e seleção de características, sendo que os melhores resultados foram obtidos por métodos de seleção de características. O modelo construído pela combinação de Wavelet Package e o k-NN apresentou 99,82% de acurácia, sendo este o melhor valor encontrado.

Nayana and Geethanjali (2017), estudaram a modelagem de sinais de vibração para a detecção de falhas em rolamentos, através de parâmetros estatísticos no domínio do tempo. Os descritores estatísticos utilizados para a construção dos modelos foram o comprimento de forma de onda (WL), alterações no sinal de inclinação (SSC), integral de sinal simples (SSI), amplitude de Wilson (WAMP), valor absoluto médio (MAV) e cruzamento zero (ZC) sendo estes comparados com os descritores convencionais tais como desvio padrão (STD), variância (VAR), assimetria (SKW), valor médio (Mean), raiz média quadrática (RMS) e curtose (KURT). O estudo realizou a análise dos descritores citados, com uso dos classificadores implementados pelos algoritmos Naive Bayes (NB), SVM e Linear Discriminante Analysis (LDA). A validação dos modelos foi realizada pela técnica de k-Fold Cross Validation com 10 folds. Na comparação final do método proposto, com uso dos descritores WL, SSC, SSI, WAMP, MAV e ZC contra os descritores convencionais no domínio do tempo, todos os classificadores atingiram 100% de acurácia, independente da carga do motor do experimento. Trabalhos realizados por outros autores utilizando o mesmo conjunto de dados, porém com descritores diferentes (STD, VAR, SKW, Mean, RMS e KURT), obtiveram resultados entre 73% e 99%.

Em Tahir et al. (2017) os autores propuseram uma abordagem para melhoria da acurácia na classificação de falhas em rolamentos de esferas utilizando preditores extraídos dos sinais de vibração no domínio do tempo. O conjunto de dados utilizado foi obtido em um simulador de falhas na universidade de Curtin-Austrália. Além da classe relacionada ao funcionamento normal, foram registradas medições associadas à problemas nas pistas interna e externa do rolamento. Para a classificação, dez descritores estatísticos no domínio do tempo foram extraídos dos sinais de vibração, que constituíram os dados de entrada para os classificadores SVM, BayesNet, Decision Table e Decision Tree (DT). Segundo os autores, a abordagem proposta apresentou vantagens substanciais em relação ao custo computacional, pois a utilização dos referidos descritores resultou em modelos eficientes para os sinais de vibração, permitindo a representação dos mesmos por uma pequena quantidade de descritores estatísticos, sem perda substancial de informação. Os modelos com os descritores RMS e variância, em todos os casos atingiram o valor de 100%. Os classificadores com pior desempenho foram aqueles obtidos com descritores extraídos por valores médios e mediana no algoritmo DT, com valores de 73% e 84% respectivamente.

No trabalho de Dey et al. (2019) é proposta a utilização da técnica de autocorreção com os sinais no domínio do tempo para a detecção de falhas em rolamentos de esferas. Para a obtenção dos modelos

os autores extraíram os descritores estatísticos, valor máximo, desvio padrão, variância e valores de pico a pico dos correlogramas construídos.

Na etapa de classificação, foram utilizados os algoritmos Random Forest (RF) e k-NN, e a metodologia consistiu na divisão dos processos em três problemas binários e um problema multiclases. Ambos os classificadores apresentaram acurácia de 100%, o que segundo os autores superou os resultados até então relatados.

Trabalhos recentes mostram uma tendência no uso de técnicas de redes neurais e algoritmos genéticos para diagnóstico de falhas em rolamentos. Toma et al. (2020) apresenta uma combinação de técnicas que envolve a utilização de métodos estatísticos, algoritmo genético (AG) e técnicas de aprendizado de máquina para o diagnóstico de falhas em motores. Os descritores são extraídos dos sinais de corrente elétrica com a utilização de AG. Modelos de classificação baseados em k-NN, DT e RF são treinados e aplicados a identificação de falhas nos rolamentos do equipamento. Os autores relatam taxas de acerto superiores a 97%. Agrawal and Jayaswal (2019) fizeram um estudo comparativo entre uma rede neural artificial (RNA) e SVM para o diagnóstico e classificação de falhas em rolamento utilizando wavelets contínuas e entropia. Os resultados indicaram o melhor desempenho do SVM, que obteve acurácia de 100%, contra 96% das redes neurais.

Em Zhou et al. (2019) é utilizada uma Rede Neural Convolucional (RNC) para classificação do estado de degradação dos rolamentos. O procedimento consistiu de duas etapas. Na etapa não supervisionada, descritores dos sinais no domínio do tempo são extraídos, e utilizados como entrada de um algoritmo de clusterização k-Means, onde classes são constituídas. Na etapa supervisionada os dados categorizados são fornecidos como entrada para a RNC. A acurácia obtida no treino e teste foram, respectivamente, 98.89% e 98.58%.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Embora a maioria dos trabalhos recentes abordando o tema do diagnóstico de falhas em sistemas industriais utilizem métodos baseados em *Deep Learning*, os algoritmos de *Machine Learning* convencionais ainda são utilizados para essa finalidade. A seguir é apresentada uma breve descrição dos algoritmos Support Vector Machine, K-Nearest Neighbour, Decision Tree e Random Forest, aplicados para o treinamento dos modelos.

3.1 SUPPORT VECTOR MACHINE - SVM

Suporta Vector Machine são algoritmos de classificação supervisionada, lineares e binários, que procuram o hiperplano de separação entre as classes (Figura 1), de maneira a maximizar a distância entre as amostras mais próximas (Cortes and Vapnik, 1995). A aplicação do SVM a problema não linear pode ser possível com a utilização de funções *kernel*, que projetam o espaço amostral sobre espaços de maior dimensão onde os dados são linearmente separáveis. Exemplos de funções *kernel* que podem ser utilizadas são, quadrática, gaussiana, polinomial. Embora seja, em sua forma convencional, um algoritmo binário, que suporta apenas problemas com duas classes, a utilização de métodos multiclasse torna o SVM aplicável a problemas com mais de duas classes.

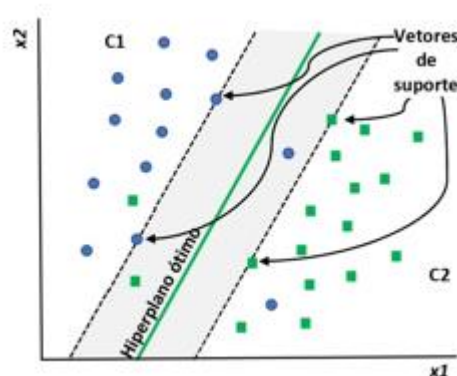


Figura 1. Exemplo ilustrativo do algoritmo SVM.

3.2 K-NEAREST NEIGHBOUR - K-NN

Classificadores implementados com base no algoritmo k-NN classificam amostras desconhecidas com base na distância entre essas e as amostras atribuídas às classes envolvidas no problema (Duda et al., 2001). Por ser de fácil implementação, esses classificadores são amplamente utilizados em problemas de classificação. Para sua implementação devem ser definidos, o número de vizinhos (k), da métrica para o cálculo da distância entre as amostras e a regra de decisão para atribuição de uma classe a uma amostra desconhecida. Uma regra de decisão comumente utilizada é atribuir à amostra desconhecida a classe da maioria das k amostras mais próximas. A Figura 2 apresenta uma ilustração de classificação utilizando o algoritmo 4-NN em um problema de três classes. Um conjunto de dados cujos objetos pertencem à C1, C2 ou C3 é representado pelos descritores x_1 e x_2 . O objeto AD, cuja classe é desconhecida, será atribuído a uma das classes do problema. Com $k = 4$, AD será atribuído a C3, pois a maioria dos $k = 4$ objetos mais próximos de AD pertencem a C3.

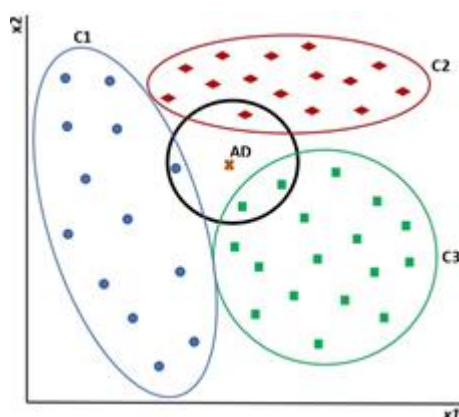


Figura 2. Exemplo ilustrativo do algoritmo k-NN com $k=4$.

3.3 DECISION TREE - DT

A DT é um método de classificação que utiliza a estratégia dividir-para-conquistar, cujo processo de decisão para atribuição de uma classe é constituído por múltiplos estágios (Webb, 2003). Sua estrutura hierárquica em forma de árvore invertida o torna um classificador de simples implementação. As DT são constituídas por nós e ramos. As regras de decisão estão associadas aos nós, onde testes são realizados para a definição do percurso ao longo da árvore. Os ramos representam os possíveis caminhos a serem percorridos de acordo com a decisão tomada no nó precedente. Decisões sucessivas são tomadas até que um nó terminal seja alcançado, onde uma classe é atribuída à amostra desconhecida (Dougherty, 2013). A implementação da DT requer a definição prévia da profundidade da árvore e do critério de decisão.

3.4 RANDOM FOREST - RF

A RF é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado, que pode ser aplicado a problemas de classificação e regressão. Uma RF é constituída por um conjunto de Árvores de Decisão, cujo algoritmo de treinamento mais comumente utilizado é o bagging. Como utiliza combinação das árvores de decisão, a Floresta Aleatória, de forma geral, é mais estável e apresenta melhor desempenho quando comparada a outros algoritmos de *Machine Learning*. A premissa sobre a qual se baseia a RF é que, um vetor aleatório v_k para a k -ésima árvore, independente dos vetores aleatórios passados $v_1, v_2, v_3, \dots, v_{k-1}$, mas com a mesma distribuição será criado. Com estes vetores aleatórios gerados, em um processo de votação envolvendo as k árvores, uma classe será atribuída à amostra desconhecida (Breiman, 2001).

4. METODOLOGIA

Nessa seção é feita uma descrição detalhada da metodologia que orientou a realização do trabalho. O conjunto de dados utilizado para a realização dos testes é apresentado, bem como os descritores extraídos a partir dos sinais. São descritas as etapas de pré-processamento e os ajustes dos parâmetros utilizados para a conjuração dos classificadores.

4.1 DESCRIÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS

O conjunto de dados de vibração utilizado é um dos mais populares no meio acadêmico para testes com modelos de Machine Learning e foi desenvolvido pela Case Western Reserve University - CWRU. A Figura 3 ilustra a bancada experimental utilizada para a aquisição dos sinais. Um motor com potência nominal de 2hp foi posto em funcionamento com cargas de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp. Os rolamentos do lado acionado (DE – Drive End) e do lado não acionado (NDE - Non Drive End.) Foram danificados artificialmente utilizando eletro descargas criando erosões com diâmetros de 0,1778 mm a 1,016 mm. Os sinais de vibração foram coletados por acelerômetros a frequências de amostragem de 12kHz e 48kHz. O conjunto de dados original é constituído por seis classes colhidas do rolamento DE. Além da condição de funcionamento normal (HDE), foram simuladas falha na pista interna (IR), falhas nas esferas (BA) e na pista externa em três posições diferentes, centralizada (ORCENT), ortogonal (ORORT) e oposta (OROPP).

Os arquivos no formato Matlab (*.mat) com os sinais coletados nos testes podem ser encontrados no link [https://](https://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home)

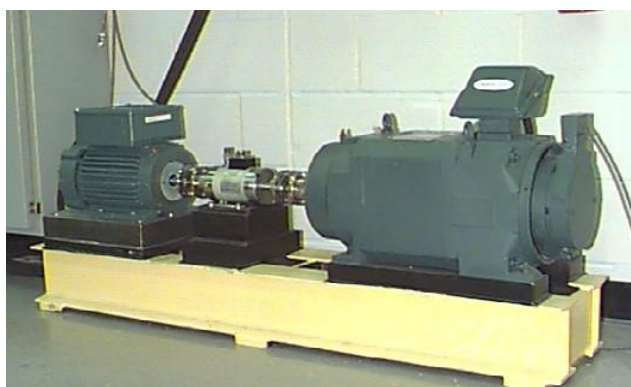


Figura 3. Conjunto experimental para a coleta do sinal de vibração dos mancais do conjunto de dados CWRU.

csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home, e estão organizados de acordo com a Tabela 1. Cada arquivo se refere a uma classe e corresponde a uma potência de carga utilizada para o teste. Por

exemplo, o arquivo 119 se refere a falha BA com o motor com carga de 1hp. Para cada classe estão disponíveis quatro arquivos referentes aos testes nas potências de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp.

Tabela 1. Organização dos arquivos com os sinais originais no site da CWRU.

Condição rolamento	Nome do arquivo (*.mat)			
	0hp	1hp	2hp	3hp
HDE	97	98	99	100
IR	105	106	107	108
BA	118	119	120	121
ORCENT	130	131	132	133
ORORT	144	145	146	147
OROPP	156	158	159	160

Para os testes realizados nesse trabalho foram utilizadas somente as medições obtidas no rolamento do lado acionado (DE), com diâmetro de falha de 0,1778 mm em todas as potências as quais o motor foi submetido. A Tabela 2 mostra a quantidade de pontos amostrais dos sinais coletados para a classe normal e para a falha simulada em cada potência.

Tabela 2. Quantidade de amostras por falha e potência dos sinais colhidos no rolamento DE.

Condição rolamento	Diâmetro Falha (mm)	Número de pontos amostrais			
		0hp	1hp	2hp	3hp
HDE	-	243938	483903	485063	485643
IR	0,1778	121265	121991	122136	122917
BA	0,1778	122571	121410	121556	121556
ORCENT	0,1778	121991	122426	121410	122571
ORORT	0,1778	122281	121846	121556	122281
OROPP	0,1778	122281	121991	122281	122136

4.2 SEGMENTAÇÃO DOS SINAIS

Os sinais originais de vibração colhidos no experimento (Tabela 2), para cada condição de funcionamento a que o rolamento DE foi submetido nos testes, foram segmentados em amostras de 2000 pontos que constituíram as classes. A coluna 3 da Tabela 3 mostra as quantidades de amostras e atributos para cada classe para cada potência do motor.

4.3 EXTRAÇÃO DE DESCRITORES

Os modelos de classificação foram treinados com descritores extraídos por duas abordagens diferentes.

Análise de componentes principais: inicialmente, as componentes principais da matriz de dados originais, extraídas com a aplicação da PCA foram utilizadas como descritores para a obtenção dos

modelos. Nesse caso, deseja-se avaliar o desempenho dos modelos a partir de um formato reduzido dos dados diretamente obtidos do processo. Para garantir que a quase totalidade das informações relevantes se mantenham na forma reduzida dos dados originais, foi assegurado que, no mínimo 95% da variabilidade contida na base de dados original seja preservada na forma reduzida. A coluna 4 da Tabela 3, mostra as dimensões das matrizes de descritores por classes, obtidos com a aplicação da PCA sobre o conjunto original. Importante destacar que a extração das componentes principais utilizadas para a modelagem foi realizada posteriormente ao particionamento dos conjuntos de treino e teste, não havendo, portanto, influência do conjunto de treino sobre o de teste.

Descritores estatísticos: vários trabalhos apresentados na Seção 2, mostraram o bom desempenho de modelos treinados através de descritores estatísticos no domínio do tempo. As Equações de 1 a 5 mostram as definições matemáticas dos descritores utilizados nessa pesquisa.

$$Média(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s(i) \quad (1)$$

$$Variância(\sigma^2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s(i) - \mu)^2 \quad (2)$$

$$Assimetria = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{s(i) - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (3)$$

$$Curtose = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{s(i) - \mu}{\sigma} \right)^4 \quad (4)$$

$$Fator\ de\ Crista = \frac{\max(|s|)}{RMS} \quad (5)$$

Em cada equação, o “s” representa as amostras individuais do conjunto de dados em cada teste. A coluna 5 da Tabela 3 apresenta as dimensões das matrizes de descritores estatísticos por classe, após a aplicação das Equações 1 a 5. Após a extração dos descritores estatísticos, as matrizes das classes foram concatenadas formando matrizes de 420x5 para a potência de 0hp, e 540x5 para as demais potências.

4.4 ANÁLISE DO ESPAÇO AMOSTRAL DOS CONJUNTOS DE DESCRITORES DERIVADOS DA PCA E PELO MÉTODO ESTATÍSTICO

A obtenção de modelos com boa capacidade de separação das classes, além do bom desempenho dos algoritmos, depende da extração de descritores que, de fato, forneçam uma boa representação das amostras no espaço amostral.

Tabela 3. Dimensões das matrizes por classe e por potência com os sinais originais segmentados (coluna 3), após aplicação da PCA (coluna 4) e após extração de descritores estatísticos (coluna 5).

Potência	Classes	Matrizes de atributos		
		Original	PCA	Estatístico
0hp	HDE	120x2000	120x104	120x5
	IR	60x2000	60x104	60x5
	BA	60x2000	60x104	60x5
	ORCENT	60x2000	60x104	60x5
	ORORT	60x2000	60x104	60x5
	OROPP	60x2000	60x104	60x5
1hp	HDE	240x2000	240x115	240x5
	IR	60x2000	60x115	60x5
	BA	60x2000	60x115	60x5
	ORCENT	60x2000	60x115	60x5
	ORORT	60x2000	60x115	60x5
	OROPP	60x2000	60x115	60x5
2hp	HDE	240x2000	240x114	240x5
	IR	60x2000	60x114	60x5
	BA	60x2000	60x114	60x5
	ORCENT	60x2000	60x114	60x5
	ORORT	60x2000	60x114	60x5
	OROPP	60x2000	60x114	60x5
3hp	HDE	240x2000	240x121	240x5
	IR	60x2000	60x121	60x5
	BA	60x2000	60x121	60x5
	ORCENT	60x2000	60x121	60x5
	ORORT	60x2000	60x121	60x5
	OROPP	60x2000	60x121	60x5

As Figuras 4 e 5 ilustram os espaços amostrais dos conjuntos de descritores obtidos pela PCA e pelos descritores estatísticos, respectivamente, para as quatro potências de carga.

A Figura 4 ilustra o espaço amostral representado pelas duas primeiras componentes principais após aplicação da PCA. Pode ser notado que, para as quatro potências de carga, há uma superposição, acentuada das amostras das classes. Esse arranjo das classes pode representar uma maior dificuldade para a obtenção de classificadores com boa capacidade de separabilidade e de predição a partir de descritores derivados pela aplicação da PCA no conjunto de dados originais.

A Figura 5 ilustra o espaço amostral representado pelos descritores estatísticos média x variância. Como pode ser observado, as utilizações dos descritores estatísticos para representação dos sinais de vibração, comparativamente aos descritores oriundos da PCA, melhoram significativamente a

separabilidade das classes, o que favorece a obtenção de classificadores com boa capacidade de predição.

4.5 TREINAMENTO DOS MODELOS

Os modelos de classificação foram treinados com os algoritmos k-NN, SVM, DT e RF. Os critérios de divisão utilizados para implementação dos classificadores DT foram o gini index e o cross entropy, sendo em todos os casos utilizadas árvores com profundidade 10. No algoritmo k-NN foi utilizada a métrica de distância euclidiana e variados os números de vizinhos em 1, 3 e 5. No classificador SVM foram testados os kernels linear, gaussian e polynomial. Com a RF foram testados os modelos variando o número

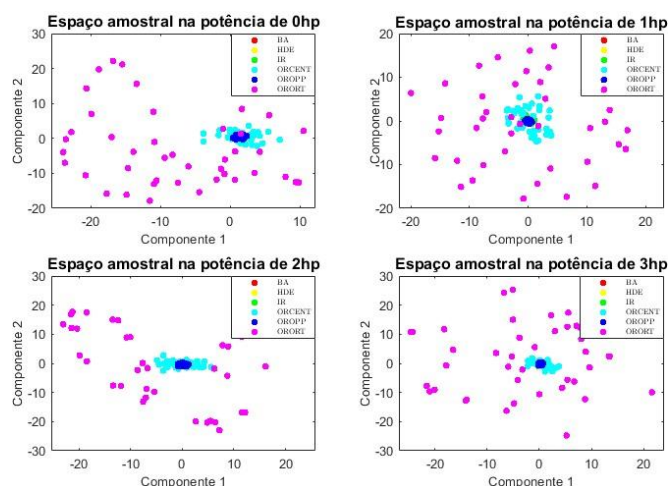


Figura 4. Espaços amostrais com duas componentes principais para potências de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp.

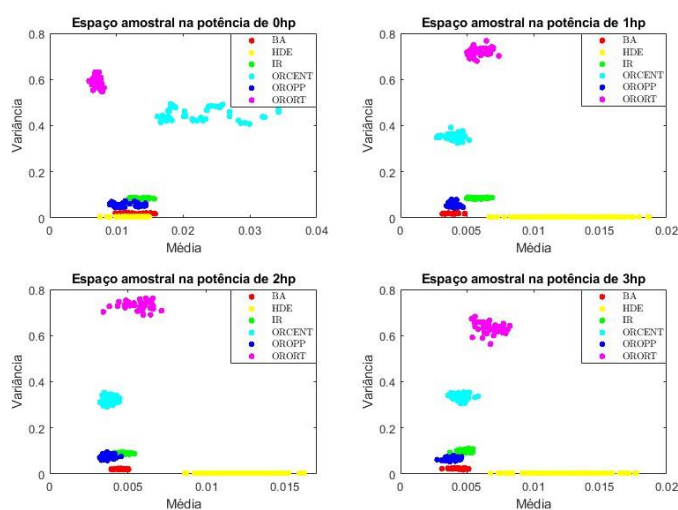


Figura 5. Espaços amostrais com atributos estatísticos para potências de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp.

Árvores, sendo 5, 10, 15 e 20 para os descritores estatísticos e 10, 20, 50, 100 e 200 para PCA. O conjunto de dados foi dividido em dados de treinamento, com 70% das amostras, e dados de testes com os 30% restantes. O desempenho dos modelos foi avaliado pela técnica k-Fold Cross Validation com $k=10$, e foi utilizada a métrica de acurácia. Todos os testes foram realizados utilizando o Matlab R, versão R2018b.

5. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados de classificação obtidos durante as etapas de treinamento e testes conforme a metodologia apresentada anteriormente. Na sequência, os resultados serão apresentados (i) utilizando os descritores extraídos através da PCA e (ii) através dos dados estatísticos.

5.1 RESULTADOS UTILIZANDO DESCRITORES ATRAVÉS DA PCA

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos pelos classificadores DT, k-NN, SVM e RF. A métrica utilizada para medir o desempenho dos classificadores durante as etapas de treinamento e testes foi a acurácia. Conforme pode ser observado nas tabelas, o desempenho dos classificadores durante as etapas de treinamento e testes apresentou baixa performance. O melhor resultado é obtido utilizando o classificador SVM (Tabela 6), com acurácia de 85,70% utilizando o kernel *gaussian* sem carga no motor (0 hp) e acurácia de 88,90% com cargas no motor variando de 1 a 3 (hp). Contudo, ao se comparar os resultados dos treinos e dos testes para esse classificador, nota-se que na maioria dos testes ocorreu um problema de *underfitting*, isto é, os modelos apresentaram baixo desempenho no treino e desempenho significativamente melhor nos testes. O oposto disso ocorreu com a maioria dos modelos obtidos por DT. Nesse caso, exceto para a potência de 3 hp, todos os modelos sofreram *overfitting*, isto é, o desempenho no treino foi significativamente melhor que no teste, embora os resultados no treino não tenham sido bons. Conforme visto anteriormente na Figura 4, o espaço amostral representado desse conjunto de dados apresenta sobreposições interclasses e grande dispersão na classe ORORT, isso explica o baixo desempenho dos modelos devido à pouca separabilidade das classes nos descritores utilizados.

Tabela 4. Resultados com classificador DT

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	Entropy	61,22	14,30
	Gini	61,22	23,00
1	Entropy	57,67	17,90
	Gini	61,38	14,20
2	Entropy	74,60	24,10
	Gini	71,96	23,50
3	Entropy	67,72	23,50
	Gini	65,34	19,10

Tabela 5. Resultados com classificador k-NN

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	k=1	75,51	71,40
	k=3	63,95	73,00
	k=5	58,84	76,20
1	k=1	66,93	69,70
	k=3	65,34	63,60
	k=5	62,17	59,30
2	k=1	76,46	67,90
	k=3	71,16	61,70
	k=5	68,78	60,10
3	k=1	74,87	67,30
	k=3	68,25	62,30
	k=5	64,29	59,90

5.2 RESULTADOS UTILIZANDO DESCRITORES ESTATÍSTICOS

As Tabelas 8, 9, 10 e 11 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos pelos classificadores DT, k-NN, SVM, e RF. A mesma metodologia utilizada anteriormente, com os descritores baseados na PCA, foi utilizada nas etapas de treinamento e testes com os dados estatísticos. De forma geral, todos os modelos obtiveram bom desempenho nas etapas de treinamento e testes, atingindo valores de acurácia em 100%.

Nos resultados utilizando DT (Tabela 8), é possível verificar que a regra de divisão utilizando entropy foi ligeira- mente superior ao método utilizando índice gini. Para o

Tabela 6. Resultados com classificador SVM

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	Gaussian	42,18	85,70
	linear	38,44	82,50
	Polynomial	30,95	69,00
1	Gaussian	55,29	88,90
	linear	48,94	75,30
	Polynomial	46,83	55,60
2	Gaussian	55,03	88,90
	linear	59,26	65,40
	Polynomial	52,91	55,6
3	Gaussian	55,56	88,9
	linear	56,88	77,20
	Polynomial	46,83	55,6

Tabela 7. Resultados com classificador RF

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	10 trees	63,61	77,00
	20 trees	70,75	74,60
	50 trees	80,95	69,00
	100 trees	85,71	68,30
	200 trees	87,76	69,80
1	10 trees	67,99	78,40
	20 trees	73,28	79,00
	50 trees	78,04	79,60
	100 trees	80,95	82,70
	200 trees	85,98	79,60
2	10 trees	68,78	77,20
	20 trees	78,31	77,20
	50 trees	83,86	73,50
	100 trees	88,62	74,10
	200 trees	91,80	69,80
3	10 trees	70,63	74,10
	20 trees	77,51	72,80
	50 trees	84,66	74,70
	100 trees	86,24	71,00
	200 trees	87,30	74,10

Classificador k-NN (Tabela 9), em todas as configurações utilizadas para as diferentes cargas de potência do motor, foi possível obter acurácia acima de 91,30% sendo que o melhor resultado foi obtido utilizando o valor de $k = 3$, o qual obteve uma acurácia de 100% nas etapas de treinamento e testes. O classificador SVM (Tabela 10), de forma geral, obteve os melhores resultados utilizando o kernel do tipo *polynomial*, no qual em todas as configurações obteve acurácia em 100% nas etapas de treinamento e testes. Os resultados de classificação utilizando o modelo RF (Tabela 11) obtiveram desempenhos acima de 98,40% de acurácia, sendo que, a partir de uma coleção igual ou superior a dez árvores, em todas as configurações foi possível obter taxas de acerto em 100% nas etapas de treinamento e testes para os diferentes tipos de cargas do motor.

Conforme visto anteriormente na Figura 5, os descritores baseados em dados estatísticos apresentam boa separabilidade interclasses e baixa dispersão dos dados intraclasses. Os bons resultados de classificação nas etapas de treinamento e testes comprovam que não houve um sobreajuste (overfitting) dos modelos utilizados.

6.CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, são utilizadas duas metodologias para extração de características através de sinais de vibração

Tabela 8. Resultados com classificador DT

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	Entropy	100,00	100,00
	Gini	100,00	100,00
1	Entropy	99,74	100,00
	Gini	99,74	99,42
2	Entropy	100,00	100,00
	Gini	100,00	100,00
3	Entropy	100,00	100,00
	Gini	100,00	100,00

Tabela 9. Resultados com classificador k-NN

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	k=1	92,18	91,30
	k=3	92,52	93,70
	k=5	93,54	92,10
1	k=1	100,00	100,00
	k=3	100,00	100,00
	k=5	100,00	100,00
2	k=1	100,00	100,00
	k=3	100,00	100,00
	k=5	100,00	100,00
3	k=1	99,74	100,00
	k=3	100,00	100,00
	k=5	99,74	99,74

Tabela 10. Resultados com classificador SVM

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	Gaussian	93,20	92,90
	linear	86,05	86,50
	Polynomial	98,98	100,00
1	Gaussian	100,00	100,00
	linear	99,74	100,00
	Polynomial	100,00	100,00
2	Gaussian	100,00	100,00
	linear	99,47	100,00
	Polynomial	100,00	100,00
3	Gaussian	99,74	100,00
	linear	97,88	98,80
	Polynomial	99,74	100,00

Tabela 11. Resultados com classificador RF

Potência[hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste
0	5 trees	99,90	100,00
	10 trees	99,98	100,00
	15 trees	99,99	100,00
	20 trees	100,00	100,00
1	5 trees	99,94	99,40
	10 trees	100,00	100,00
	15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00
2	5 trees	99,94	100,00
	10 trees	100,00	100,00
	15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00
3	5 trees	99,94	100,00
	10 trees	100,00	100,00
	15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00

Num simulador de equipamentos dinâmicos, o qual possui diferentes naturezas de operação como condição normal (sem falha) e diferentes falhas em rolamentos, as quais são comuns em equipamentos rotativos utilizados em instalações industriais. A partir dos resultados experimentais obtidos, foi possível comprovar que a análise dos sinais originais com dimensão reduzida com a utilização da PCA não permite a obtenção de bons modelos de classificação, tendo em vista o arranjo complexo das amostras no espaço amostral, onde apresentam pouca separabilidade. Outro fator que cooperou para os resultados ruins com os descritores da PCA foi a perda de informação relevante para a modelagem quando da redução das dimensões do espaço amostral. O melhor resultado utilizando a PCA (88,90%) não garante a confiabilidade e a precisão de um diagnóstico inteligente. Os descritores baseados em dados estatísticos, em geral, obtiveram bons resultados de classificação (100%), sendo que os melhores resultados foram obtidos com o classificador DT, utilizando entropy

como regra de decisão, e com o classificador RF com uma coleção de dez árvores. O bom resultado apresentado com os descritores baseados em dados estatísticos comprovam a boa separabilidade dos dados, o que facilita o desempenho dos algoritmos de classificação utilizados. Os resultados dos testes mostram a viabilidade de se implementar sistemas de diagnósticos precisos e confiáveis no monitoramento de equipamentos dinâmicos utilizando técnicas de machine learning para o reconhecimento de padrões de falhas.

REFERÊNCIAS

- Agrawal, P. and Jayaswal, P. (2019). Diagnosis and classifications of bearing faults using artificial neural network and support vector machine. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 1–12. doi: 10.1007/s40032-019-00519-9.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324. URL <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Chen, Z., Gryllias, K., and Li, W. (2019). Mechanical fault diagnosis using Convolutional Neural Networks and Extreme Learning Machine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133, 106272. doi:10.1016/j.ymssp.2019.106272.
- Cortes, C. and Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. In *Machine Learning*, 273–297.
- Dey, S., Roy, S.S., Samanta, K., Modak, S., and Chatterjee, S. (2019). Autocorrelation based feature extraction for bearing fault detection in induction motors. In *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 1–5.
- Dougherty, G. (2013). *Pattern Recognition and Classification: An Introduction*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Duda, R.O., Hart, P.E., and Stork, D.G. (2001). *Pattern Classification*. Wiley, New York, 2 edition.
- Nayana, B.R. and Geethanjali, P. (2017). Analysis of statistical time-domain features effectiveness in identification of bearing faults from vibration signal. *IEEE Sensors Journal*, 17(17), 5618–5625.
- Rauber, T.W., de Assis Boldt, F., and Varejão, F.M. (2015). Heterogeneous feature models and feature selection applied to bearing fault diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(1), 637–646.
- Tahir, M.M., Khan, A.Q., Iqbal, N., Hussain, A., and Badshah, S. (2017). Enhancing fault classification accuracy of ball bearing using central tendency based time domain features. *IEEE Access*, 5, 72–83.
- Toma, R., Prosvirin, A., and Kim, J. (2020). Bearing fault diagnosis of induction motors using a genetic algorithm and machine learning classifiers. *Sensors*. doi:10.3390/s20071884.
- Webb, A. (2003). *Statistical Pattern Recognition*. Wiley InterScience electronic collection. Wiley.
- Zhang, R., Peng, Z., Wu, L., Yao, B., and Guan, Y. (2017). Fault diagnosis from raw sensor data using deep neural networks considering temporal coherence. *Sensors*, 17, 549. doi:10.3390/s17030549.
- Zhang, S., Zhang, S., Wang, B., and Habetler, T.G. (2019). Machine learning and deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. *CoRR*, abs/1901.08247. URL <http://arxiv.org/abs/1901.08247>.
- Zhou, Q., Shen, H., Zhao, J., Liu, X., and Xiong, X. (2019). Degradation state recognition of rolling bearing based on k-means and cnn algorithm. *Shock and Vibration*, 2019, 1–9. doi:10.1155/2019/8471732.

Capítulo 3



10.37423/230107099

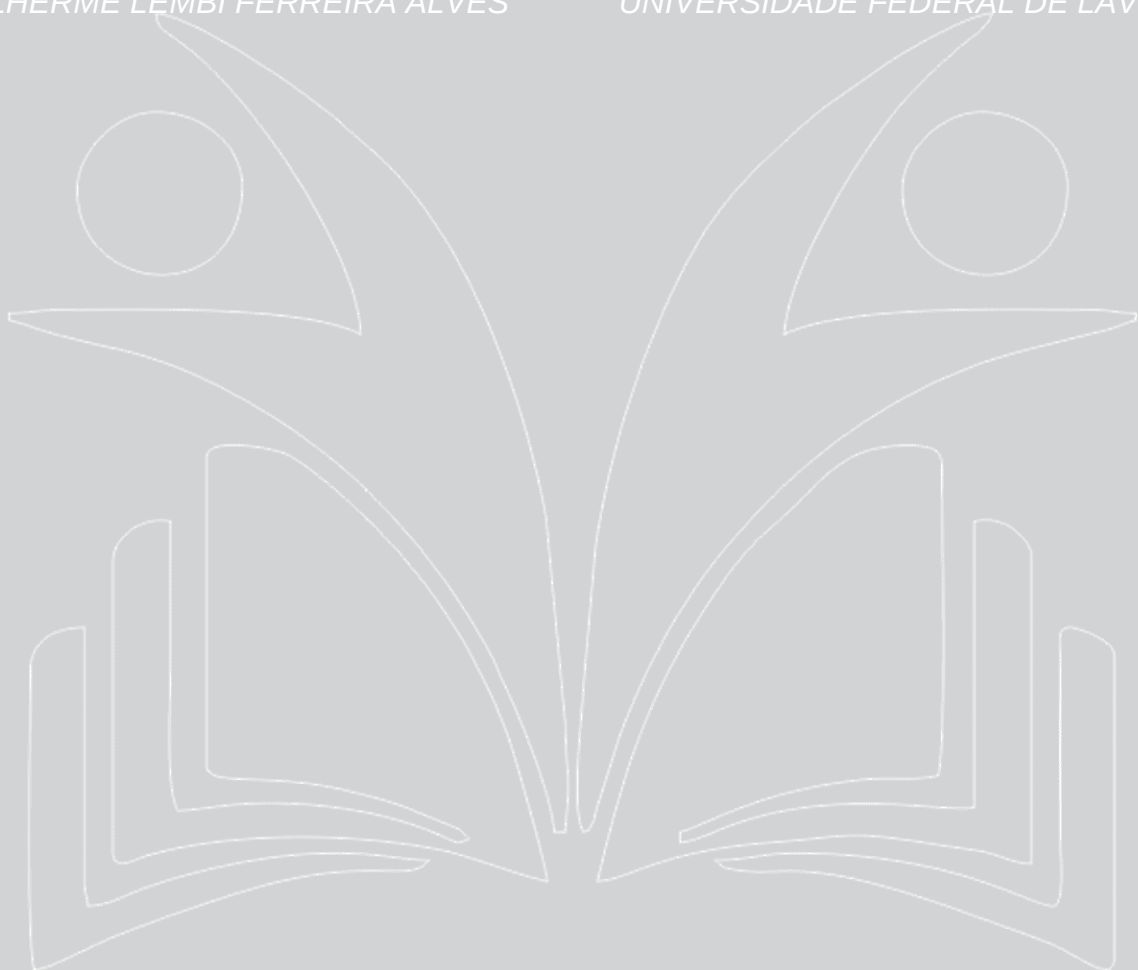
TESTE DE ACEITAÇÃO SENSORIAL DE LICORES DE BAIXA CALORIA COM POLPA DE MAROLO (ANONA CRASSIFLORA)

OLGA LUCIA MONDRAGÓN-BERNAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

JOSÉ GUILHERME LEMBI FERREIRA ALVES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS



Resumo – O licor artesanal é uma forma de aproveitamento de frutos regionais e agregação de valor. O marolo (*Anona Crassiflora*) é nativo do cerrado mineiro. Este estudo teve por alvo desenvolver licor de marolo com reduzido teor calórico. Foi realizado Delineamento Experimental Composto Central Rotacional 22 com 11 ensaios. Proporções de infusão marolo/cachaça (73,8-426,8 g/L) e de xarope de sacarose substituído por sucralose (0-60%) foram testadas. A Polpa homogeneizada de marolo permaneceu em infusão hidrolcoolica por 15 dias, foi misturada com xarope, engarrafada e envelhecida por 30 dias na escuridão. Testes microbiológicos demonstraram aptidão dos licores para o consumo. 30 provadores (público alvo) avaliaram sensorialmente os licores. Modelos quadráticos foram ajustados para as respostas cor e impressão global validados pela ANOVA ($p \leq 0,1$). Um licor elaborado com 60% de substituição de sacarose e polpa de marolo 250 g/L de solução hidroalcoólica, teve boa aceitação e intenção de compra..

1. INTRODUÇÃO

O Marolo, também chamado de articum-do-campo, ata ou pinha é uma espécie que ocorre nos cerrados do Brasil, e suas frutas de sabor adocicado são aproveitadas, ao natural ou em forma de suco, pelas populações onde aparece esta planta (Tomasi, 2004). O maroleiro é uma árvore de 6 a 8 metros de altura, com o diâmetro da copa chegando a 2–4 m, da família das anonáceas. A planta tem preferência por regiões de cerrado com menor déficit de umidade, em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, pequena parte do interior de São Paulo e em partes isoladas de Goiás, Mato Grosso, Tocantins, Maranhão e leste da Bahia. Mas é em Minas Gerais que o fruto é típico e muito apreciado, especialmente em Paraguaçu; Os frutos alcançam mais de 15 cm de diâmetro e 2 kg de peso, contendo muitas sementes com cerca de 1,5 cm de comprimento. Como muitas fruteiras nativas, os frutos do maroleiro ainda são pouco explorados comercialmente, restringindo-se a feiras e estradas, a pesar da realidade de consumo crescente (Polo, Manchila, & Rezente, 2008).

O licor artesanal constitui uma forma refinada de aproveitamento da matéria-prima existente na propriedade rural, principalmente frutos regionais, agregando valor à produção e aumentando a renda familiar. É uma atividade que faz parte da cultura mineira, agradando a paladares exigentes e perpetuando tradições (Souza & Braganza, 2001). Além disso, seu processamento exige tecnologias simples, o produto final é comercializado à temperatura ambiente e apresenta extensa vida de prateleira (Texeira, Ramos, Chaves, Silva, & Stringueta, 2005). Os licores são uma categoria de bebidas que tem se reinventado, tanto pela evolução tecnológica como pela diversidade de sabores, e obteve um crescimento nas vendas no mercado brasileiro nos últimos anos, atingindo um volume de vendas anuais ao redor de 7 milhões de litros, representando 2,9% do mercado brasileiro de bebidas alcoólicas que faz o consumidor nacional dividir sua atenção entre os licores de produção informal e as grandes marcas nacionais e globais (ABRABE, 2013). No entanto, poucos são os estudos científicos sobre licores de frutas, principalmente licores de frutas exóticas com reduzido teor calórico; para o caso do marolo, existem já formulações para a produção do licor da fruta, um deles data desde 1913 no município de Paraguaçu - Minas Gerais (de Carvalho & Aduino, 2010), mas é necessário pesquisar em relação à aceitação do consumidor contra as mudanças no produto, como a redução da quantidade de açúcar, o sabor residual da sucralose, e as preferências nas proporções de fruta utilizadas, procurando obter uma formulação renovada de um produto ainda pouco explorado.

Este estudo contribuirá para o desenvolvimento de um licor de baixa caloria com polpa de marolo (*Anona Crassiflora*), como alternativa comercial para a redução do teor de açúcar nos licores e o

aproveitamento de uma fruta do cerrado Brasileiro, como é o Marolo, aplicando técnicas de delineamento experimental fatorial e análise sensorial com escala hedônica não estruturada para aceitação pelo público alvo, realizado após obtenção do parecer da comissão de ética.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os licores de baixa caloria a partir de marolo foram produzidos no laboratório de Operações Unitárias do departamento de ciência dos alimentos DCA da UFLA. Para a fabricação dos licores foram utilizadas polpas de marolo congeladas fornecidas pela Associação dos Agricultores Familiares de Três Pontas (AQUI13P). As polpas foram descongeladas e em seguida homogeneizadas.

Foi utilizada Cachaça com graduação alcoólica de 39% (v/v) adquirida no comercio de Lavras, sucralose (Proceedings Ltda), açúcar refinado (marca União) para formulação das bebidas. Foram utilizados recipientes de aço inox para a infusão hidroalcoólica e garrafas de vidro para armazenamento da bebida.

As etapas do trabalho foram divididas da seguinte forma: pesagem dos ingredientes, mistura da polpa em infusão hidroalcoólica e armazenamento durante 8 dias, filtração da infusão, produção da xarope sacarose: sucralose, mistura da infusão com o xarope, maturação durante 30 dias, análises físico-químicas e microbiológicas.

Os licores foram elaborados seguindo todos os preceitos das boas práticas de Higiene e Fabricação de Alimentos e as normas brasileiras para licores doces, sendo que, licor fino ou doce corresponde à bebida que contém mais de cem e no máximo trezentos e cinquenta gramas de açúcares, por litro (BRASIL, 1999), na formulação se utilizo uma proporção de 200 g de sacarose/Litro de solução hidroalcoólica ou seu equivalente em sucralose.

Foram produzidos aproximadamente 600 ml de licor para cada amostra e distribuídos em embalagens individuais de vidro tampados hermeticamente, devidamente rotulados, armazenados na escuridão e a temperatura ambiente no laboratório de Operações Unitárias do Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da UFLA. Foram realizadas análises microbiológicas de. Coliformes totais e termotolerantes no laboratório de Engenharia de Bioprocessos do DCA/UFLA.

Foi realizado um delineamento completo DCCR (Delineamento Composto Central Rotacional) 22, sendo 4 tratamentos, 4 pontos axiais ($\pm 1,141$) e 3 pontos centrais para um total de 11 ensaios em 2 repetições. Os licores foram feitos pelo método de infusão. Os ensaios foram elaborados utilizando

diferentes proporções de infusão polpa de marolo/solução alcoólica cachaça comercial (73.8 g/L; 125 g/L; 250 g/L, 375g/L e 426.8g/L) e de xarope de açúcar: sucralose, sendo que as substituições de sacarose por sucralose foram de 0, 10, 30,50 e 60%. As variáveis independente e os níveis do DCCR encontram-se especificados na Tabela 1.

	Níveis do DCCR 2 ²				
Variáveis	-1,41	-1	0	1	1,41
X1(g/L)	73,8	125	250	375	426,8
X2	0	10	30	50	60

X1= g de polpa de Marolo/ L de solução hidroalcoólica.**X2**=Proporção de substituição de açúcar por sucralose.

Foram realizadas análises estatísticas, com ajuda do software STATISTICA 8.0. Foram analisados os efeitos das variáveis, a ANOVA e ajuste ao modelo de segunda ordem (eq.1):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + e \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde x1 e x2, representam as variáveis codificadas e β_0 , β_1 , β_2 e β_{12} são para os parâmetros do modelo de regressão, estimadas pelo método dos mínimos quadrados (Rodrigues e lemma, 2009)

ANÁLISE SENSORIAL

A análise sensorial foi realizada no laboratório de análise sensorial do Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA) da UFLA. As amostras foram avaliadas por 30 provadores não treinados maiores de 18, consumidores de licores e potenciais consumidores do produto, selecionados aleatoriamente dentro da comunidade do DCA/UFLA que assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido das condições do teste e da amostra.

O teste sensorial foi de tipo afetivo e os provadores avaliaram amostras utilizando uma escala hedônica não estruturada de nove centímetros ancorada nos extremos, nela, os consumidores expressaram sua aceitação seguindo a escala que varia gradativamente entre os atributos “desgostei extremamente” e “gostei extremamente” (MIMIM, 2010) em relação a: cor, aroma, sabor, doçura, e impressão global. Também foi avaliada a intenção de compra, utilizando uma escala estruturada de cinco pontos, variando entre 5 igual a “certamente compraria o produto” e 1 igual a “certamente não compraria o produto”.

Aproximadamente 5 mL de cada amostra foram servidos em cálices de acrílico transparentes e com tampa para evitar evaporação do álcool, à temperatura ambiente em blocos causalizados de máximo quatro amostras por sessão. Os copos foram codificados aleatoriamente com 3 dígitos e servidos em bandejas acompanhados de água e bolacha de sal. Foi solicitado a cada provador que experimente uma amostra de cada vez, da esquerda para a direita, após experimentado o sabor foi solicitado o descarte da amostras (ou não ingestão) e morder um pedaço de bolacha de sal e/ou enxaguar o palato entre uma amostra e outra. Finalmente os provadores colocaram as suas avaliações e observações na ficha específica.

Uma vez atingido o número mínimo de provadores, foi realizado a análise estatística dos resultados do teste sensorial através da análise de variância a 95% de confiança, foi feita análise dos efeitos das variáveis e análise de superfícies de resposta e ajuste ao modelos quadráticos de segunda ordem, por meio do programa Statistica 8.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO ANÁLISE SENSORIAL DO DCCR

Na Tabela 2 podem ser observadas as médias das análises sensoriais realizadas nos 11 ensaios de licor de marolo de baixa caloria pelo DCCR, junto com a análise de uma amostra comercial de licor de marolo ou amostra padrão. Observa-se que o ensaio 2, elaborado com 375 gramas de polpa de marolo por litro de infusão alcoólica e 10% de substituição de sacarose por sucralose, apresentou a melhor média global em todos os aspectos sensoriais, sendo que a amostra comercial teve as notas mais baixas dos testes média de aceitação global de 4,69 contra 6,13 da amostra 2. No entanto, a nota para intenção de compra dos potenciais consumidores foi superior (3,04) para a amostra comercial do que para os outros ensaios. O ensaio 8 que foi formulado com o menor teor calórico, ou seja, maior substituição de sacarose por sucralose (60%) e 250 g/L de polpa, apresentou média de aceitação global de 5,49 e intenção de compra de 2,71, já o ensaio 6 com maior teor de polpa de marolo e 30% de substituição de sacarose, obteve média 5,91 e 2,34 respectivamente. Esses ensaios, por tanto, são boas alternativas de formulação com alta aceitação e intenção de compra e cumprem com o objetivo principal de redução do teor calórico da bebida.

Tabela 2 - Média das notas obtidas após análise sensorial dos ensaios do DCCR para formulação de Licor de Marolo.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes ou resposta					
	Valores codificados		Valores reais							
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	Cor	Aroma	Sabor	Doçura	Impressão Global	Intenção de Compra
1	-1	-1	125	10	5,69	5,39	5,51	5,78	5,39	2,74
2	1	-1	375	10	6,01	5,79	6,23	6,35	6,13	2,46
3	-1	1	125	50	5,09	4,93	4,93	5,07	5,07	2,91
4	1	1	375	50	6,16	5,43	5,63	6,21	5,53	2,74
5*	-1,41	0	73,8	30	4,97	4,92	5,08	5,06	4,84	2,89
6*	1,41	0	426,8	30	6,14	5,55	5,93	5,65	5,91	2,43
7*	0	-1,41	250	0	6,04	5,23	5,53	5,32	5,41	2,64
8*	0	1,41	250	60	6,02	5,22	5,53	5,23	5,49	2,71
9**	0	0	250	30	5,15	5,10	5,58	5,69	5,69	2,60
10**	0	0	250	30	5,67	5,57	5,92	5,67	5,50	2,53
11**	0	0	250	30	5,30	5,78	5,44	5,27	5,27	3,00
12***					2,94	4,12	4,86	4,81	4,69	3,04

* Pontos axiais **Pontos centrais ***Amostra de licor de marolo comercial (padrão) X1: g de polpa de Marolo/ L de solução hidroalóica;

X2: Porcentagem de substituição de sacarose por sucralose (%)

Análise dos efeitos e ANOVA para otimização sensorial da formulação de licor de marolo de reduzido teor calórico.

Na Tabela 3 são apresentadas as análises de variância de todas as respostas sensoriais avaliadas a partir do DCCR para o licor de marolo de reduzido teor calórico. Somente as respostas cor e impressão global apresentaram efeito significativo validado pela ANOVA a 90% de confiança. Sendo que o teor de polpa mostrou-se como a variável com maior efeito significativo positivo ($p < 0,1$) na maioria das respostas sensoriais (cor, aroma, doçura e impressão global), isso significa que quanto maior a quantidade de polpa utilizada na formulação da bebida maior será a sua aceitação. Na Tabela 2 encontram-se também os modelos ajustados na equação 1 e validados pela ANOVA ($p < 0,1$) para as respostas cor e impressão global.

Tabela 3 - ANOVA para os atributos sensoriais: cor, aroma, sabor, doçura, impressão global para licor de Marolo.

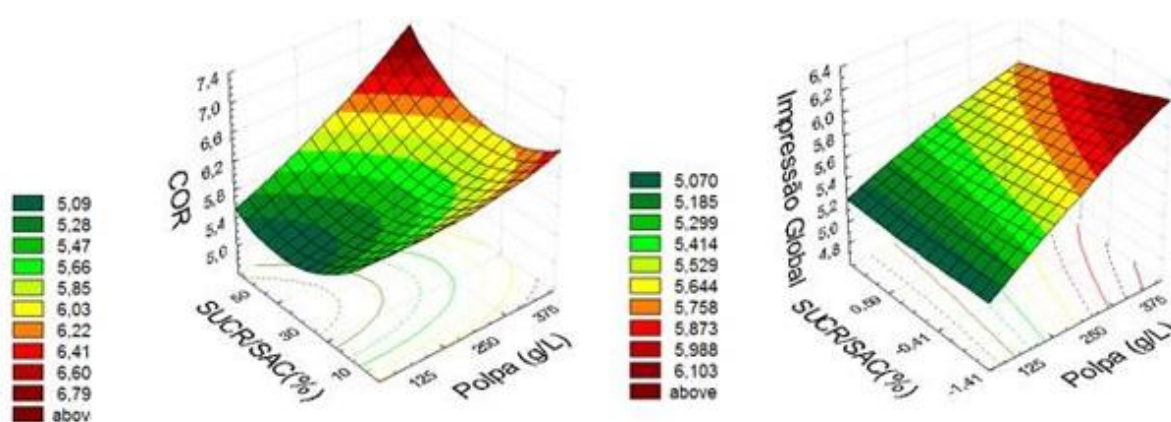
Atributo	R ²	f calculado	f tabelado	Modelo validado pela ANOVA*
Cor	0,91	10,42*	5,05	$Y = 5,37 + 0,38X_1 - 0,08X_1^2 - 0,06X_2 + 0,32X_2^2 - 0,19$
Aroma	0,60	1,5	5,05	
Sabor	0,77	3,43	5,05	
Doçura	0,55	1,2	5,05	
Impressão global	0,80	3,92*	5,05	$Y = 5,49 + 0,34X_1 - 0,03X_1^2 - 0,10X_2 + 0,01X_2^2 - 0,07$

*Em negrito as respostas significativas a 90% de confiança validadas pela ANOVA.

*f tabelado maior que f calculado (F10, 5,5)

A figura 1 apresenta as superfícies de resposta geradas a partir dos modelos ajustados permitem afirmar que quanto maior a quantidade de polpa de marolo e para maiores ou menores substituições por sucralose, maior será a aceitação da cor e melhor será a impressão global pelo público alvo.

Figura 1. Superfícies de resposta para otimização de: (a) cor e b) Impressão global em licor de marolo.



4. CONCLUSÃO

Foi possível obter licores de marolo com reduzido teor calórico e com parâmetros sensoriais dentro dos padrões, como cor e intenção de compra os mais significativos. além de otimização de formulação para esse objetivo. Uma bebida elaborada com 60% de substituição de sacarose por sucralose e 250 g de polpa de marolo por litro de solução hidroalcoólica, teve boa aceitação e intenção de compra.

O melhor ensaio por apresentar as melhores notas nos quesitos aroma, sabor, doçura e impressão global no teste de aceitabilidade foi o ensaio número 2, com 10% de substituição de sacarose por sucralose e 375g de polpa de marolo por litro de solução hidroalcoólica.

5. REFERÊNCIAS

- BRASIL. (1999). Portaria CVS 6, de 10 de março de 1999. São Paulo: Secretaria de estado de saúde de São Paulo.
- CARVALHO, G. A., & ADAUTO, S. (2010). Licor de marolo: 101 años. Paraguaçu/MG: Jornal "A voz da cidade".
- MIMIM, V. (2010). Análise Sensorial. Estudos com consumidores. 2ª Edição: p. 50-110. NUNES, C., & PINHEIRO, A. (2013). SensoMaker, versão 1.7. Lavras: UFLA.
- PENHA, E. (2006). Produção de um licor de acerola. Tese. Doutorado em ciência dos alimentos: Universidade Estadual de Campinas.
- POLO, M., MANCHILA, T. D., & REZENDE, M. E. (2008). Biometria do fruto e formas de produção e comercialização do marolo (*Annona Crassiflora*) na microrregião de Alfenas/MG. In: 59º Congresso Nacional de Botânica.
- RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2ª ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e amor, 2009. 358p
- SOUZA, C., & BRAGANZA, M. (2001). Doces de Minas: Processamento artesanal de frutas. Belo Horizonte: Editorial Curitiba.
- TEXEIRA, L., RAMOS, A., CHAVES, J., SILVA, P., & STRINGUETA, P. (2005). Avaliação Tecnológica da extração alcoólica no processamento do licor de banana. BOLETIM CEPA. Curitiba: v.23, n.2, p.329-346.
- TOMASI, M. C. (2004). FRUTAS. sabor à primeira dentada. São Paulo: Senac.

AGRADECIMENTOS

Às agências financiadoras, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), ao PIBIC/UFLA e ao Departamento de Ciências dos Alimentos da UFLA pelos auxílios prestados aos projetos de pesquisa realizados no Laboratório de Bioprocessos e Laboratório de Análise sensorial da UFLA.

Capítulo 4



10.37423/230107102

EFEITO SINÉRGICO ENTRE A PRECIPITAÇÃO ELETROSTÁTICA E A FILTRAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

Bruno José Chiaramonte de Castro

Universidade Federal de São Carlos

Camila Raquel de Lacerda

Universidade Federal de São Carlos

Bruna Râmela de Melo

Universidade Federal de São Carlos

Rafael Sartim

Universidade Federal do Espírito Santo

Mônica Lopes Aguiar

Universidade Federal de São Carlos



Resumo: A exposição a nanopartículas representa um grande risco à saúde humana, já que, uma vez inaladas, elas podem atingir os bronquíolos e alvéolos e passar para a corrente sanguínea, sendo então transportadas por todo o corpo. Várias doenças graves têm sido relacionadas à inalação de ar poluído com nanopartículas, como por exemplo disfunções vasculares e danos permanentes ao sistema nervoso central. Uma das alternativas promissoras para controle de emissões de material particulado pelas indústrias é o filtro híbrido, que combina a precipitação eletrostática e a filtração em um único equipamento. Embora bons resultados tenham sido obtidos e reportados para a coleta de micropartículas, há poucos estudos disponíveis na literatura que avaliaram o desempenho de filtros híbridos para nanopartículas. O objetivo deste estudo foi investigar se o efeito sinérgico relatado em trabalhos prévios para partículas maiores em filtros híbridos é também evidenciado para nanopartículas, com diâmetros na faixa de 10–300 nm. Um filtro híbrido (HF) em escala de bancada, composto por um precipitador eletrostático (ESP) seguido por um filtro de não-tecido (FF) de poliacrilonitrila foi utilizado. O HF foi testado com ar contendo nanopartículas de NaCl à velocidade superficial de filtração de $1,0 \text{ m min}^{-1}$. O aerossol foi amostrado a montante do ESP, entre o ESP e o FF, e a jusante do FF, e seguiu para um sistema de análise de partículas por diferencial de mobilidade elétrica (Scanning Mobility Particle Sizer – SPMS). As amostras coletadas entre o ESP e o FF foram também analisadas por um eletrômetro. A penetração de nanopartículas pelo filtro de poliacrilonitrila foi 29,3 % menor quando o filtro era usado como parte do HF em comparação com o mesmo filtro operando como um dispositivo único de filtração, o que aumentou o fator de qualidade do filtro de poliacrilonitrila em 13,6 %. O aumento na eficiência de coleta do filtro ocorreu devido à intensificação da atração eletrostática entre as partículas que passaram pelo ESP sem serem coletadas e as fibras de poliacrilonitrila, como evidenciado pelo aumento da corrente elétrica gerada pelo aerossol amostrado entre o ESP e o FF. Os resultados mostraram que o filtro híbrido é mais que uma mera combinação entre dois eficientes equipamentos de coleta, mesmo para partículas extremamente finas. Um efeito sinérgico foi observado, já que a tensão elétrica aplicada ao ESP aumentou a eficiência de coleta no FF.

Palavras-chave: Filtro híbrido, nanopartículas, eficiência de coleta, atração eletrostática, filtração de gases.

INTRODUÇÃO

Além de causar danos por vezes irreversíveis ao meio ambiente, a poluição do ar tem impacto direto na saúde humana. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que 99 % da população mundial está exposta a ar poluído e que aproximadamente sete milhões de pessoas morrem prematuramente todos os anos devido aos efeitos da poluição do ar (WHO, 2021). Dentre os contaminantes do ar está o material particulado, com tamanhos que variam desde pouco nanômetros até alguns micrômetros, e composições químicas muito diversificadas. O risco à saúde humana aumenta com a diminuição do tamanho das partículas inaladas, já que quanto menor o tamanho delas, mais profundamente elas podem penetrar no sistema respiratório. Nanopartículas representam risco adicional pois, uma vez nos alvéolos, podem passar para a corrente sanguínea e serem transportadas por todo o corpo.

Assim, a inalação de ar poluído com material particulado tem sido relacionada não só ao desenvolvimento de doenças respiratórias, mas também a doenças cardíacas, derrames, cânceres e diminuição das funções cognitivas (BURNETT et al., 2014; MENG et al., 2016; AILSHIRE et al., 2017; SCHRAUFNAGEL et al., 2019). Além disso, a mais recente pandemia provocada pelo coronavírus SARS-CoV-2 reacendeu as discussões sobre maneiras eficientes de controle de concentração de nanopartículas em ambientes fechados.

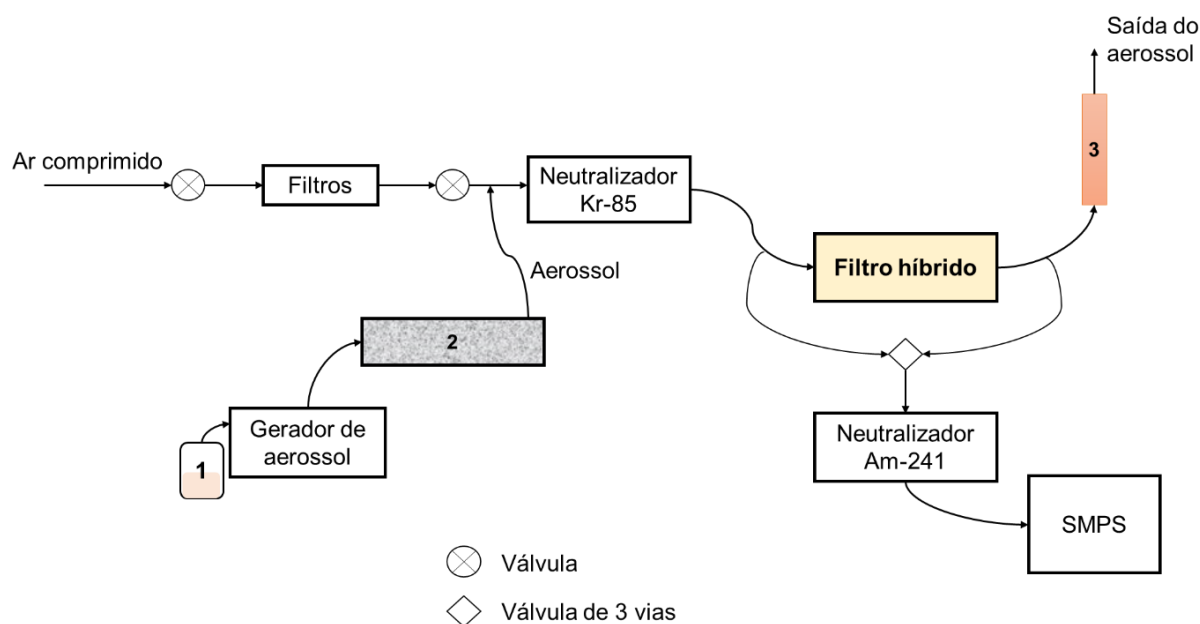
Precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas são amplamente utilizados para controle de emissões de material particulado e prevenção da poluição do ar. A combinação entre os dois equipamentos é chamada de filtro híbrido (HF) (CHANG, 1992; MILLER, 1999, 2002; PEDERSEN; POULSEN, 2011). O objetivo de tal combinação é tirar proveito da baixa queda de pressão de precipitadores eletrostáticos, da alta eficiência de coleta de partículas submicrônicas em filtros de mangas, e da sinergia entre as duas operações. Como as partículas são carregadas eletrostaticamente no precipitador eletrostático (ESP), a eficiência de coleta das mangas instaladas a jusante do ESP pode ser aumentada. Partículas carregadas podem induzir a formação de cargas de imagem na superfície das fibras dielétricas do meio filtrante e, conseqüentemente, serem atraídas a elas (WANG, 2001). Estudos prévios mostraram que a intensificação da atração eletrostática entre as partículas e as fibras é uma alternativa promissora para a filtração de gases, já que a eficiência de coleta do filtro, η_{FF} , é aumentada sem aumento da queda de pressão, ΔP , através do filtro, o que faz com que o fator de qualidade do filtro, QF , aumente (Equação 1) (FENG et al., 2016; CHOI et al., 2017; LI et al., 2018).

$$QF = \frac{-\ln(1 - \eta_{FF})}{\Delta P} \quad (1)$$

Estudos sobre filtração eletrostaticamente assistida disponíveis na literatura avaliaram a eficiência de coleta de partículas maiores que 300 nm (LONG; YAO, 2012; SHI; EKBERG, 2015; TU et al., 2017) ou trabalharam com filtros energizados (FENG et al., 2016; CHOI et al., 2017, 2018; KERNER et al., 2018, 2020; LI et al., 2018; TIAN et al., 2018). A atração eletrostática entre as partículas e as fibras de filtros energizados é aumentada por atuação das forças de Coulomb, que agem entre partículas e fibras carregadas com cargas opostas, e por dieletroforese, que ocorre após a polarização da partícula por um campo elétrico e não depende da carga da partícula. A atração por forças de Coulomb e a dieletroforese são mais fortes que a força de imagem, que age quando apenas as partículas estão carregadas (WANG, 2001; KERNER et al., 2018, 2020). Este trabalho teve como objetivos avaliar a eficiência de coleta de nanopartículas com diâmetros na faixa de 10–300 nm em um filtro híbrido em escala de bancada e investigar se há sinergia entre as operações de precipitação eletrostática e filtração para estas partículas extremamente finas, sem modificar as propriedades dielétricas do filtro ou polarizá-lo com um campo elétrico externo. A faixa de tamanho das partículas avaliadas corresponde ao tamanho de muitos vírus e algumas bactérias pequenas, agentes patogênicos que são facilmente suspensos no ar devido ao seu pequeno tamanho.

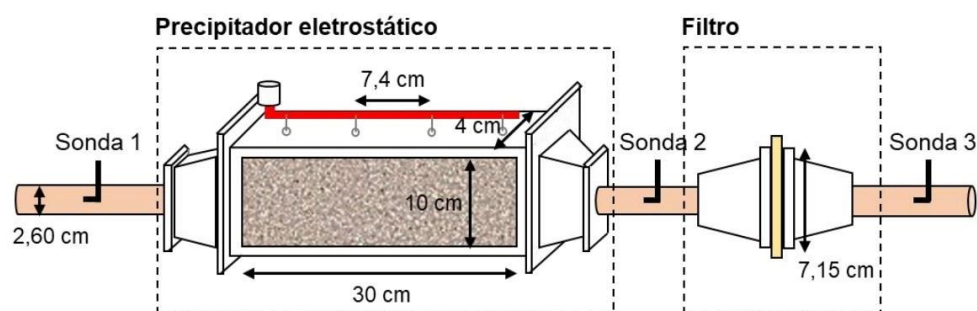
MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em duplicata no aparato experimental mostrado na Figura 1. As nanopartículas foram geradas a partir de uma solução de cloreto de sódio (NaCl) à concentração de 1,0 g L⁻¹, preparada com NaCl puro (Synth) e água deionizada, a qual alimentava o gerador de aerossol TSI 3079A. O aerossol gerado passava por sílica gel contida em um secador por difusão TSI 3062 para remoção de umidade e se misturava ao ar comprimido e filtrado. Um neutralizador de criptônio-85 era usado para prover uma distribuição bem definida de cargas ao aerossol, o qual atingia o HF. Um rotâmetro Gilmont 14 CP90533 (resolução de 0,5 NL min⁻¹) era instalado a jusante do HF, e a vazão volumétrica de aerossol era ajustada manualmente para 4,0 L min⁻¹. Amostras do aerossol passavam por um neutralizador de amerício-241 para evitar distúrbios nas análises e seguiam, então, para o sistema de análise por diferencial de mobilidade elétrica (*Scanning Mobility Particle Sizer* – SPMS), composto por um classificador eletrostático TSI 3080, um analisador de mobilidade diferencial (DMA), e um contador de partículas TSI 3776.

Figura 1 – Aparato experimental com SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*).

1- Solução de NaCl; 2- Secador por difusão; 3- Rotâmetro SMPS – *Scanning Mobility Particle Sizer*

Uma vista esquemática do HF que fazia parte do sistema mostrado na Figura 1 é apresentado na Figura 2. O HF era composto por um precipitador eletrostático (ESP) e um filtro (FF). O ESP era do tipo placa-fio de simples estágio, feito de acrílico, com duas placas de cobre aterradas com altura de 10 cm, comprimento de 30 cm e distância de 4 cm entre elas. Quatro fios de aço inoxidável com diâmetros de 0,55 mm arranjados na região central entre as placas e conectados a uma fonte de alta tensão Spellman SL300 (resolução de 0,1 kV) faziam o papel de eletrodos de descarga. A tensão aplicada ao ESP era -8,0 kV, o que resultou em um campo elétrico de $4,0 \text{ kV cm}^{-1}$. O meio filtrante era alocado em um suporte com área de filtração circular com diâmetro de 7,15 cm. Como a área da seção transversal do ESP e a área de filtração do FF eram iguais a 40 cm^2 , tanto a velocidade de escoamento no ESP como a velocidade superficial de filtração no FF eram iguais a $1,0 \text{ m min}^{-1}$. O meio filtrante era feito de poliacrilonitrila (PAN), com espessura de $2,57 \pm 0,09 \text{ mm}$, gramatura de $537,1 \pm 5,6 \text{ g m}^{-2}$ e diâmetro médio de fibras de $15,67 \pm 3,64 \text{ }\mu\text{m}$. Uma imagem da superfície do meio filtrante, obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) FEG Philips XL30, é apresentada na Figura 3.

Figura 2 – Vista esquemática lateral do filtro híbrido.**Figura 3** – Imagem obtida em MEV da superfície do filtro PAN (Magnificação de 50x).

O aerossol era amostrado a montante do ESP (sonda de amostragem 1), entre o ESP e o FF (sonda de amostragem 2) e a jusante do FF (sonda de amostragem 3). O esquema de amostragem adotado durante os testes de filtração está apresentado na Tabela 1, e as equações utilizadas para calcular as eficiências de coleta do ESP, η_{ESP} , do FF, η_{FF} , e do filtro híbrido, η_{HF} , para cada réplica estão listadas na Tabela 2. A eficiência de coleta de cada equipamento foi o valor médio dos três resultados obtidos a partir das equações. O desempenho do filtro PAN como um único equipamento de filtração foi também avaliado por meio da medição da eficiência de coleta do FF sem aplicação de tensão ao ESP.

O aerossol amostrado na sonda 2, entre o ESP e o FF, foi também analisado em um eletrômetro TSI 3068B (resolução de 0,01 fA). As correntes elétricas geradas pelo aerossol no eletrômetro foram usadas para estimar a carga elétrica média das partículas que passavam pelo ESP sem serem coletadas. Neste caso, o neutralizador de Am-241 não era utilizado, para preservar as cargas elétricas das partículas. As medições, com tempo de 200 s cada, foram realizadas em triplicata com e sem a aplicação de tensão ao ESP. A carga elétrica média das partículas, $\bar{q}$, foi estimada de acordo com a Equação 2, em que I é a corrente elétrica média medida pelo eletrômetro, I_{HEPA} é a corrente elétrica

gerada com a utilização de um filtro HEPA (high efficiency particulate arrestance) PALL Gelman Sciences 12144, usado para zerar o eletrômetro, Q_{elet} é a vazão de amostragem do eletrômetro, igual a $0,3 \text{ L min}^{-1}$, e C é a concentração numérica média de partículas no aerossol.

Tabela 1 – Esquema de amostragem adotado durante os ensaios de filtração.

Amostra	Posição	Sonda de amostragem	Concentração numérica medida ($\# \text{ cm}^{-3}$)
1	Antes do ESP	1	C_1
2	Entre o ESP e o FF	2	C_2
3	Após o FF	3	C_3
4	Entre o ESP e o FF	2	C_4
5	Antes do ESP	1	C_5
6	Entre o ESP e o FF	2	C_6
7	Após o FF	3	C_7
8	Entre o ESP e o FF	2	C_8
9	Antes do ESP	1	C_9
10	Entre o ESP e o FF	2	C_{10}
11	Após o FF	3	C_{11}
12	Entre o ESP e o FF	2	C_{12}
13	Antes do ESP	1	C_{13}

Tabela 2 – Cálculo das eficiências de coleta do precipitador eletrostático (ESP), do filtro (FF) e do filtro híbrido (HF) para cada réplica.

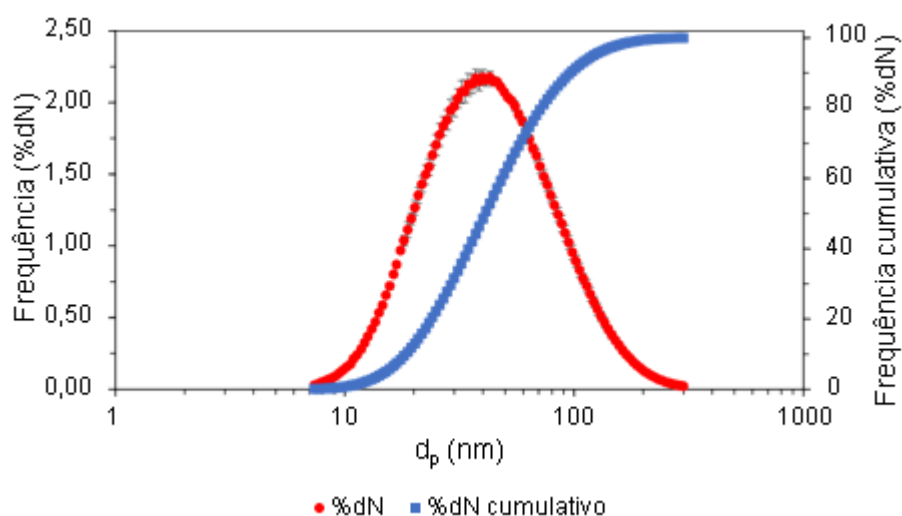
	Eficiência de coleta do ESP, η_{ESP}	Eficiência de coleta do FF, η_{FF}	Eficiência de coleta do HF, η_{HF}
1	$\frac{C_1 + C_5}{2} - C_2 / \left(\frac{C_1 + C_5}{2} \right)$	$\frac{C_2 + C_4}{2} - C_3 / \left(\frac{C_2 + C_4}{2} \right)$	$\frac{C_1 + C_5}{2} - C_3 / \left(\frac{C_1 + C_5}{2} \right)$
2	$\frac{C_5 + C_9}{2} - C_6 / \left(\frac{C_5 + C_9}{2} \right)$	$\frac{C_6 + C_8}{2} - C_7 / \left(\frac{C_6 + C_8}{2} \right)$	$\frac{C_5 + C_9}{2} - C_7 / \left(\frac{C_5 + C_9}{2} \right)$
3	$\frac{C_9 + C_{13}}{2} - C_{10} / \left(\frac{C_9 + C_{13}}{2} \right)$	$\frac{C_{10} + C_{12}}{2} - C_{11} / \left(\frac{C_{10} + C_{12}}{2} \right)$	$\frac{C_9 + C_{13}}{2} - C_{11} / \left(\frac{C_9 + C_{13}}{2} \right)$

$$\bar{q} = \frac{I - I_{HEPA}}{Q_{elet} C} \quad (2)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de tamanhos das partículas geradas a partir da solução de NaCl é apresentada na Figura 4, que mostra as curvas de frequência e de frequência cumulativa como funções do diâmetro de mobilidade elétrica das partículas, d_p . A distribuição apresentou comportamento unimodal, com pico único em 42,90 nm, diâmetro mediano de 40,95 nm, média geométrica de $42,33 \pm 0,67$ nm e desvio padrão geométrico de $1,88 \pm 0,02$.

Figura 4 – Distribuição de tamanho das partículas na entrada do filtro híbrido.

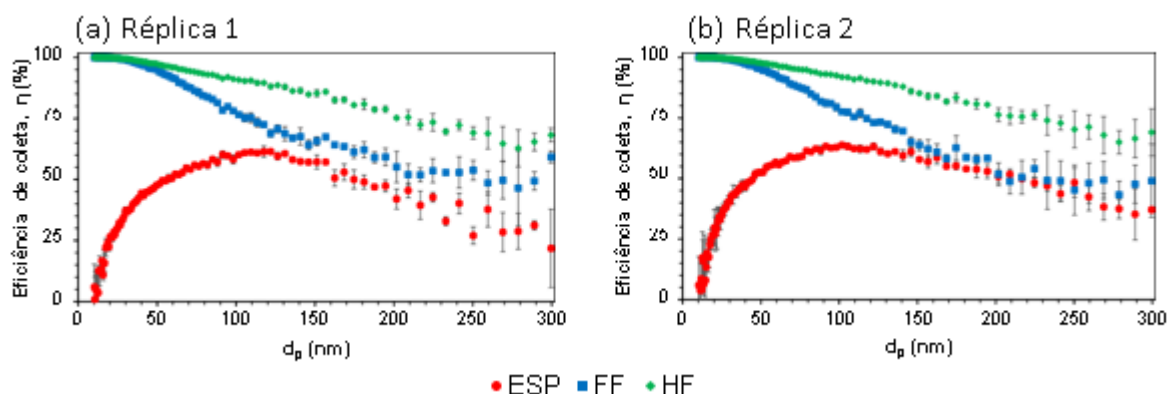


As eficiências de coleta do ESP, do FF, e do HF para partículas com diâmetros na faixa de 10–300 nm são apresentadas na Tabela 3. As eficiências como funções do diâmetro das partículas estão apresentadas na Figura 5. Os resultados para ambas as réplicas foram similares e estão discutidos na sequência.

Tabela 3 – Eficiências de coleta (10–300 nm) do precipitador eletrostático (ESP), do filtro (FF), e do filtro híbrido (FF).

	η_{ESP} (%)	η_{FF} (%)	η_{HF} (%)
Réplica 1	41,50	94,35	96,74
Réplica 2	45,86	94,57	97,09
Média (desvio padrão)	43,68 (3,08)	94,46 (0,16)	96,91 (0,25)

Figura 5 – Eficiências de coleta do precipitador eletrostático (ESP), do filtro (FF), e do filtro híbrido (HF) como funções do diâmetro de mobilidade elétrica das partículas.



A eficiência de coleta do ESP foi baixa para partículas extremamente finas, com diâmetros ao redor de 10 nm. Tais partículas adquirem poucas cargas elétricas, e, conseqüentemente, a velocidade de migração delas em direção às placas coletoras é baixa. Poucas partículas nessa faixa de tamanho são efetivamente desviadas do fluxo gasoso, o que explica sua baixa eficiência de coleta no ESP (MORAWSKA et al., 2002; DE OLIVEIRA and GUERRA, 2018). As eficiências aumentaram gradualmente com o aumento do diâmetro das partículas, até atingirem valores máximos, de aproximadamente 60 %, para partículas com diâmetros de 100–120 nm. Partículas com diâmetros maiores que 120 nm eram muito grandes para serem carregadas eficientemente por meio do carregamento difusional, mas muito pequenas para que o carregamento por campo fosse efetivo, o que levou a outra região de baixa eficiência (PARKER, 2003).

No FF, as partículas foram coletadas principalmente devido ao mecanismo de difusão Browniana, cuja eficiência diminui com o aumento do diâmetro das partículas, o que explica o comportamento das curvas azuis apresentadas na Figura 5. As eficiências de coleta do FF atingiram valores mínimos inferiores a 50 % para partículas de 280 nm em ambas as réplicas. Partículas maiores, com diâmetros próximos ao final da faixa avaliada, eram coletadas de maneira mais eficiente pelo FF devido à atuação de outros mecanismos de coleta, como a interceptação direta e a impactação inercial (DONOVAN, 1985; HINDS, 1999). A eficiência do HF foi resultado das eficiências de coleta dos dois equipamentos que o compunham. A coleta de partículas extremamente finas, no início da faixa avaliada, foi muito alta, devido à eficiência de quase 100 % proporcionada pelo FF. As eficiências do HF diminuíram com o aumento do diâmetro das partículas, mas de maneira mais gradual que a eficiência do FF, devido à coleta no ESP.

A Tabela 4 apresenta as eficiências de coleta para partículas com diâmetros na faixa de 10–300 nm para o ESP e o FF como equipamentos separados e atuando juntos como partes do HF. As eficiências de coleta no ESP foram as mesmas, já que este equipamento estava instalado a montante do FF. Por outro lado, a eficiência de coleta no FF aumentou quando o filtro era parte do HF. A significância estatística do aumento foi verificada por meio de um teste t, que comprovou que as eficiências médias foram estatisticamente diferentes, com p-valor de $5,57 \cdot 10^{-8}$. Além disso, o aumento representa uma redução de 29,3 % na penetração de partículas através do FF, o que é uma redução expressiva, considerando que o filtro não foi modificado nem energizado. A queda de pressão através do FF foi de 18,9 Pa e não aumentou durante os experimentos, já que a duração dos testes, de aproximadamente 70 min, não foi suficiente para que as nanopartículas formassem uma torta de filtração. Portanto, o fator de qualidade do filtro aumentou 13,6 % quando ele era usado juntamente com o ESP. O aumento no fator de qualidade indica uma vantagem considerável do HF em termos de gasto energético e controle de emissões de nanopartículas.

Tabela 4 – Eficiências de coleta (10–300 nm) do precipitador eletrostático (ESP), e do filtro (FF) como equipamentos separados e como um único filtro híbrido, e fatores de qualidade, QF , em ambas as configurações.

	η_{ESP} (%)	η_{FF} (%)	QF (Pa ⁻¹)
Equipamentos separados	43,68 ± 3,08	92,16 ± 0,34	0,135
Filtro híbrido	43,68 ± 3,08	94,46 ± 0,16	0,153

Os resultados indicaram que, quando o ESP estava ativo a montante do FF, a coleta de partículas pelas fibras do filtro foi intensificada, o que sugere que pelo menos parte das partículas que não foram coletadas pelas placas do ESP carregavam cargas elétricas. Portanto, além do mecanismo mecânico de difusão Browniana, as partículas eram também coletadas por atração eletrostática no FF. Como as fibras do filtro não eram carregadas eletricamente, a atração eletrostática ocorreu por atuação da força de imagem, que age quando as fibras são polarizadas pelas cargas elétricas das partículas (DONOVAN, 1985; HINDS, 1999). A formação de dendritos também é favorecida pela presença de cargas elétricas nas partículas, especialmente nos estágios iniciais da filtração de profundidade. Como os dendritos possuem o mesmo diâmetro das partículas e se projetam em direção ao escoamento gasoso, a coleta de partículas subsequentes é intensificada (WANG, 2001; TU et al., 2016).

As correntes elétricas geradas pelo aerossol amostrado entre o ESP e o FF confirmaram a hipótese de que as partículas que passaram pelo ESP ativo carregavam mais cargas elétricas em comparação a

situação em que o ESP estava desligado. Quando não era aplicada tensão ao ESP, a corrente elétrica medida pelo eletrômetro foi de $0,06 \pm 0,09$ fA, o que indicou uma carga elétrica média de $0,014 \cdot 10^{-22}$ C (Eq. 2). Com campo elétrico de $4,0 \text{ kV cm}^{-1}$ aplicado ao ESP, a corrente elétrica gerada pelo aerossol aumentou para $0,37 \pm 0,09$ fA. A carga elétrica média estimada das partículas foi então de $1,178 \cdot 10^{-22}$ C, aproximadamente 85 vezes maior que o valor anterior.

Shi; Ekberg (2015) também reportaram aumento significativo na eficiência de coleta de um filtro devido à intensificação da força de imagem. O filtro era um M6 sintético, e a eficiência de coleta, que era de 92 % sem atração eletrostática, aumentou para 100 %. Os diâmetros das nanopartículas usadas para avaliação do filtro estavam na faixa de 300–500 nm, maiores que os diâmetros das nanopartículas usadas neste estudo (10–300 nm). Partículas maiores podem adquirir mais cargas elétricas, intensificando, dessa forma, a atração eletrostática entre elas e as fibras dielétricas do filtro, o que pode ser a razão para a maior redução na penetração de partículas alcançada por Shi; Ekberg (2015).

Outros trabalhos utilizaram nanopartículas com diâmetros similares aos das nanopartículas utilizadas neste estudo (CHOI et al., 2017; KERNER et al., 2018, 2020; TIAN et al., 2018). Entretanto, a atração eletrostática entre as partículas e as fibras foram intensificadas por atração de Coulomb: além do carregamento eletrostático das nanopartículas, eles trabalharam com filtros de eletreto, modificaram as propriedades dielétricas do filtro, ou polarizaram o meio filtrante com um campo elétrico externo. Como a força de Coulomb é mais forte que a força de imagem, as reduções na penetração de partículas reportadas por eles foram também mais expressivas que a redução reportada aqui. Os resultados da literatura sugerem que o desempenho do filtro utilizado neste estudo poderia ser ainda melhorado se o filtro fosse polarizado.

CONCLUSÃO

O filtro híbrido coletou as nanopartículas de 10–300 nm com eficiência de 96,91 %, maior que as eficiências do precipitador eletrostático e do filtro operando como equipamentos separados, iguais a 43,68 e 92,16 %, respectivamente. Além disso, um efeito sinérgico foi observado entre as operações de precipitação eletrostática e filtração. O desempenho do filtro de poliacrilonitrila foi significativamente melhorado quando o filtro era usado como parte do filtro híbrido. A penetração de partículas através do filtro diminuiu 29,3 % em comparação com a penetração no mesmo filtro operando como equipamento único, enquanto a queda de pressão se manteve inalterada. O aumento na eficiência de coleta foi atribuído à intensificação da atração eletrostática entre as nanopartículas

que passaram pelo ESP sem serem coletadas e as fibras dielétricas de poliacrilonitrila. Portanto, o filtro híbrido mostrou-se ser mais que uma mera combinação entre dois coletores de partículas, mesmo para partículas extremamente finas, sendo uma alternativa promissora para controle de emissões de nanopartículas pelas indústrias e de concentração de nanopartículas em ambientes fechados, por exemplo. O desempenho da filtração pode ser melhorado ainda mais por meio da substituição do filtro por um filtro de eletreto ou pela polarização do meio filtrante.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [142086/2019-3], Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) [001], ArcelorMittal [44/2015] e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) [97/04024-7]. As instituições não tiveram envolvimento no planejamento do estudo, na coleta, análise e interpretação dos dados, na redação do trabalho, nem na decisão de enviar o artigo para publicação.

REFERÊNCIAS

- AILSHIRE, J.; KARRAKER, A.; CLARKE, P. Neighborhood social stressors, fine particulate matter air pollution, and cognitive function among older U.S. adults. *Social Science & Medicine*, v. 172, p. 56–63, 2017.
- BURNETT, R. T.; POPE, C. A.; EZZATI, M.; OLIVES, C.; LIM, S. S.; MEHTA, S.; SHIN, H. H.; SINGH, G.; HUBBELL, B.; BRAUER, M.; ANDERSON, H. R.; SMITH, K. R.; BALMES, J. R.; BRUCE, N. G.; KAN, H.; LADEN, F.; PRÜSS-USTÜN, A.; TURNER, M. C.; GAPSTUR, S. M.; DIVER, W. R.; COHEN, A. An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure. *Environmental Health Perspectives*, v. 122, n. 4, p. 397–403, 2014.
- CHANG, R. Compact hybrid particulate collector (COHPAC), US5158580, 7 February 1991, 27 October 1992.
- CHOI, D. Y.; JUNG, S-H.; SONG, D. K.; AN, E. J.; PARK, D.; KIM, T-O.; JUNG, J. H.; LEE, H. M. Al-Coated Conductive Fibrous Filter with Low Pressure Drop for Efficient Electrostatic Capture of Ultrafine Particulate Pollutants. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 9, n. 19, p. 16495–16504, 2017.
- CHOI, D. Y.; HEO, K. J.; KANG, J.; AN, E. J.; JUNG, S-H.; LEE, B. U.; LEE, H. M.; JUNG, J. H. Washable antimicrobial polyester/aluminum air filter with a high capture efficiency and low pressure drop. *Journal of Hazardous Materials*, v. 351, n. February, p. 29–37, 2018.
- DE OLIVEIRA, A. E.; GUERRA, V. G. Influence of particle concentration and residence time on the efficiency of nanoparticulate collection by electrostatic precipitation. *Journal of Electrostatics*, v. 96, n. August, p. 1–9, 2018.
- DONOVAN, R. P. Fabric filtration for combustion sources: Fundamentals and basic technology. New York, New York: Marcel Dekker, Inc., 1985.
- FENG, Z.; LONG, Z.; MO, J. Experimental and theoretical study of a novel electrostatic enhanced air filter (EEAF) for fine particles. *Journal of Aerosol Science*, v. 102, p. 41–54, 2016.
- HINDS, W. C. *Aerosol Technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles*. 2. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 1999.
- KERNER, M.; SCHMIDT, K.; HELLMAN, A.; SCHUMACHER, S.; PITZ, M.; ASBACH, C.; RIPPERGER, ANTONYUK, S. Numerical and experimental study of submicron aerosol deposition in electret microfiber nonwovens. *Journal of Aerosol Science*, v. 122, n. August 2017, p. 32–44, 2018.
- KERNER, M.; SCHMIDT, K.; SCHUMACHER, S.; PUDERBACH, V.; ASBACH, C.; ANTONYUK, S. Evaluation of electrostatic properties of electret filters for aerosol deposition. *Separation and Purification Technology*, v. 239, n. November 2019, p. 116548, 2020.
- LI, C. X.; KUANG, S. Y.; CHEN, Y. H.; WANG, Z. L.; LI, C.; ZHU, G. In Situ Active Poling of Nanofiber Networks for Gigantically Enhanced Particulate Filtration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 10, n. 29, p. 24332–24338, 2018.
- LONG, Z.; YAO, Q. Numerical simulation of the flow and the collection mechanism inside a scale hybrid particulate collector. *Powder Technology*, v. 215–216, p. 26–37, 2012.

MENG, X.; ZHANG, Y.; YANG, K.-Q.; YANG, Y.-K.; ZHOU, X.-L. Potential Harmful Effects of PM_{2.5} on Occurrence and Progression of Acute Coronary Syndrome: Epidemiology, Mechanisms, and Prevention Measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 13, n. 8, p. 748, 2016.

MILLER, S. J. Advanced hybrid particulate collector and method of operation, US5938818, 22 August 1997, 17 August 1999.

MILLER, S. J. Advanced hybrid particulate collector and method of operation, US20020134237, 21 March 2001, 26 September 2002.

MORAWSKA, L.; AGRANOVSKI, V.; RISTOVSKI, Z.; JAMRISKA, M. Effect of face velocity and the nature of aerosol on the collection of submicrometer particles by electrostatic precipitator. *Indoor Air*, v. 12, n. 2, p. 129–137, 2002.

PARKER, K. *Electrical Operation of Electrostatic Precipitators*. Stevenage, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2003.

PEDERSEN, H. V.; POULSEN, K. Method and plant for dedusting a stream of dust- laden gases in a hybrid filter installation, WO2011141827, 18 March 2011, 17 November 2011.

SCHRAUFNAGEL, D. E.; BALMES, J. R.; COWL, C. T.; DE MATTEIS, S.; JUNG, S.- H.; MORTIMER, K.; PEREZ-PADILLA, R.; RICE, M. B.; RIOJAS-RODRIGUEZ, H.; SOOD, A.; THURSTON, G. D.; TO, T.; VANKER, A.; WUEBBLES, D. J. *Air Pollution*

and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air Pollution and Organ Systems. *Chest*, v. 155, n. 2, p. 417–426, 2019.

SHI, B.; EKBERG, L. Ionizer Assisted Air Filtration for Collection of Submicron and Ultrafine Particles—Evaluation of Long-Term Performance and Influencing Factors. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 11, p. 6891–6898, 2015.

TIAN, E.; MO, J.; LONG, Z.; LUO, H.; ZHANG, Y. Experimental study of a compact electrostatically assisted air coarse filter for efficient particle removal: Synergistic particle charging and filter polarizing. *Building and Environment*, v. 135, n. February, p. 153–161, 2018.

TU, G.; SONG, Q.; YAO, Q. Relationship between particle charge and electrostatic enhancement of filter performance. *Powder Technology*, v. 301, p. 665–673, 2016.

TU, G.; SONG, Q.; YAO, Q. Experimental and numerical study of particle deposition on perforated plates in a hybrid electrostatic filter precipitator. *Powder Technology*, v. 321, p. 143–153, 2017.

WANG, C.-S. Electrostatic forces in fibrous filters—a review. *Powder Technology*, v. 118, n. 1–2, p. 166–170, 2001.

WHO(WORLDHEALTHORGANIZATION).Airpollution,2021.Disponívelem:<https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1>. Acesso em 8 out. 2021.

Capítulo 5



10.37423/230107107

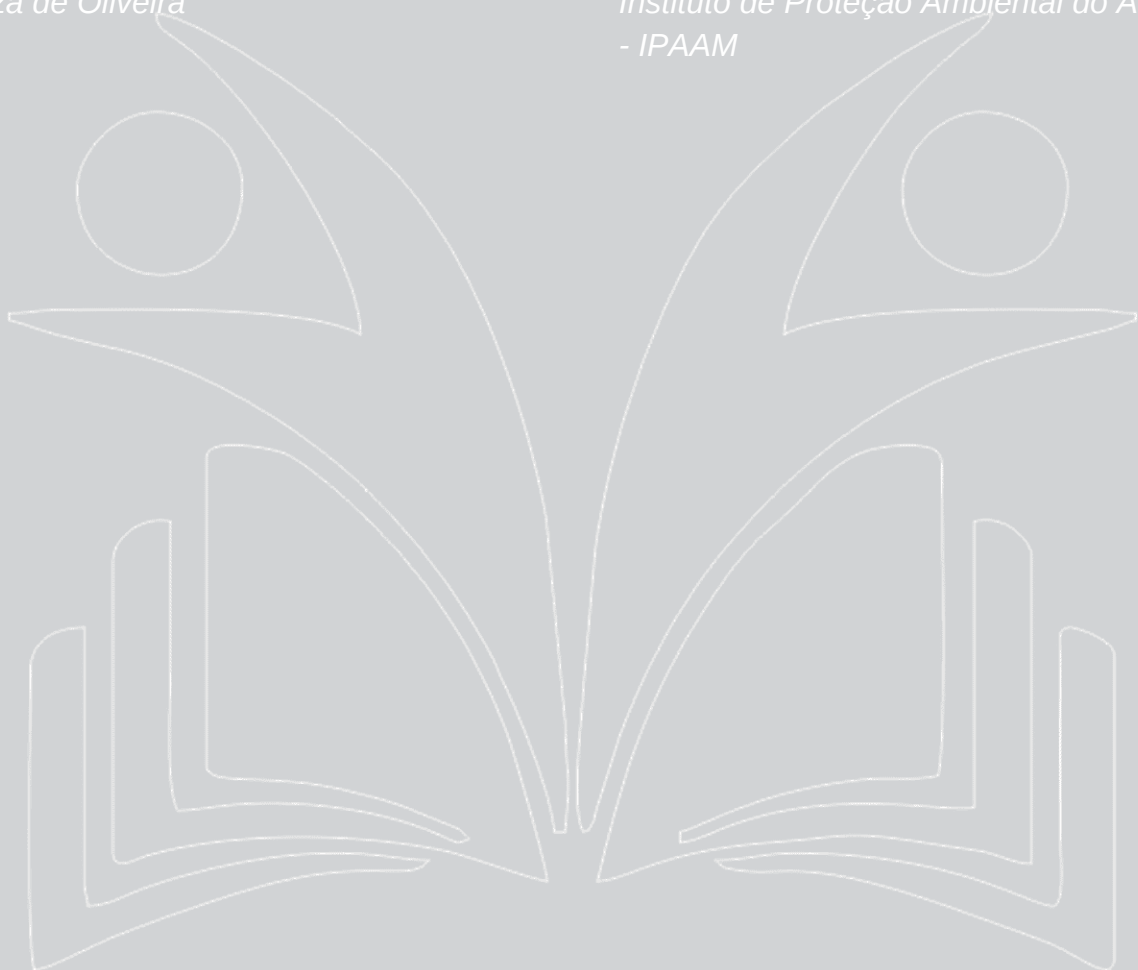
SENSIBILIZAÇÃO DO USO RACIONAL DA ÁGUA NOS MUNICÍPIOS DE ATALAIA DO NORTE, BENJAMIN CONSTANT E TABATINGA NO ESTADO DO AMAZONAS

José Francisco Aleixo da Silva

Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Breno Souza de Oliveira

*Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
- IPAAM*



Resumo: O Governo do Estado do Amazonas, a partir do ano 2000, iniciou processo de devolução dos serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário as prefeituras do interior do Estado, serviços que até então era cargo da Companhia de Saneamento do Amazonas – COSAMA. Porém algumas prefeituras relutaram em absorver estes serviços. Até o ano de 2019, 12 municípios dos 61 existentes no interior do Estado do Amazonas tinham os serviços de abastecimento de água sobre a responsabilidade do Estado. O presente trabalho apresenta de forma sintética, com relação à conscientização da população do uso racional da água nos municípios de Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga no Estado do Amazonas que tiveram ampliação e melhorias dos seus Sistemas de Abastecimento de Água, convênio celebrado entre Governo Federal e Banco Mundial no período de 2011 a 2012.

Palavras-chave: conscientização, uso racional.

INTRODUÇÃO

No período de 2011 a 2012, teve início a campanha em educação ambiental na área de Saneamento, nos municípios de Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga com realização de visitas aos domicílios, visando à aplicação do formulário de constatação da situação de abastecimento de água no domicílio, orientação sobre o uso racional da água, cobrança de tarifa pelo uso da água e realização da primeira leitura do hidrômetro.

A atividade de campo foi realizada juntamente com os agentes do projeto e contou com a participação de voluntários.

No período anteriormente citado desenvolveu-se um projeto de conscientização da população do uso racional da água nos municípios de Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga no Estado do Amazonas, uma vez que tiveram ampliação e melhorias dos seus Sistemas de Abastecimento de Água, convênio celebrado entre Governo Federal e Banco Mundial.

OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta de forma sintética, “Campanha de Sensibilização em Educação Ambiental”, com ações ambientais educativas para evitar o desperdício da água e o mau uso do sistema, tendo como público-alvo os representantes de bairro, associações, conselho municipal, agentes de saúde, defesa civil, líderes religiosos e professores visando à formação de um grupo de agentes voluntários “Amigos da Água” para apoiar a divulgação das ações de saneamento junto à população visando à sustentabilidade dos Sistemas de Abastecimento de Água nos municípios de Atalaia do Norte, Benjamin Constant e Tabatinga no Estado do Amazonas referente aos trabalhos de ampliação e melhorias realizados pelo Banco Mundial, PRODERAM, CIAMA e SEPLAN, no período de 2011 a 2012.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar o novo Sistema de Abastecimento de Água;
- Mobilizar e sensibilizar a população para a formação de agentes sociais “Amigos da Água”;
- Animar a ação dos agentes sociais como multiplicadores em educação ambiental;
- Apoiar a atuação dos agentes sociais que iriam divulgar as ações em seus bairros.

METODOLOGIA

Para cada município foi elaborado um roteiro de atividades envolvendo os seguintes aspectos:

Integração do grupo as atividades de integração foram realizadas para aumentar a participação do grupo, motivar e estimular o potencial dos participantes, principalmente das pessoas mais tímidas que em plenário geralmente não falam.

Palestra: Existem diferentes níveis de informação sobre o sistema de abastecimento de água tratada. O objetivo da palestra foi nivelar no modo geral informações sobre o acesso a água potável, como estava o atual sistema de abastecimento de água do município e como iria funcionar com a implantação do novo sistema.

Trabalho em Grupo: Esta atividade visou melhorar a discussão, socializá-las e aperfeiçoá-las em plenária. Buscou-se também, aumentar o nível de participação das pessoas e a sua responsabilização na busca de soluções para os desafios em questão.

Plenária: o debate foi fundamental para a socialização dos resultados, das tomadas de decisão e de se estabelecer a responsabilidade entre os participantes. O resultado deste processo foi a formação dos agentes com o compromisso de apoiar as ações que seriam realizadas durante a implantação do sistema de abastecimento de água tratada nos municípios.

ETAPAS DO PROGRAMA

Elaboração do Programa da Oficina de Trabalho - Convite da Oficina as Associações dos Municípios envolvidos no Projeto — Distribuição de crachás e camisas aos Colaboradores – Elaboração e distribuição de Cartazes de Procedimento para instalação do hidrômetro e ligação de água nos Municípios envolvidos no Projeto - Palestras de Conscientização nas Associações – Distribuição de Folder - Distribuição da “Cartilha das Águas” a População – Distribuição do “Caderno Metodológico” para Ações de Educação Ambiental e Mobilização Social em Saneamento a População – Banner do Projeto - Entrega de Certificados aos Colaboradores.

ETAPAS DO PROGRAMA

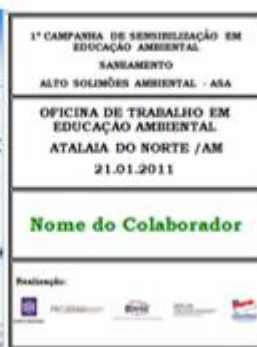
Programa da Oficina



Convite da Oficina



Crachá do Colaborador



Camisa do Colaborador



Cartaz Inst. Hidrômetro



Palestras nas Associações



Folder



Cartilha das Águas



Caderno Metodológico



Banner



Certificado do Colaborador



No período de 17 a 24 de setembro de 2012, teve início a 4ª campanha em educação ambiental na área de Saneamento, no município de Atalaia do Norte com o objetivo de realizar visita técnica aos domicílios que possuem hidrômetro instalado, visando à aplicação do formulário de constatação da situação de abastecimento de água no domicílio, orientação sobre o uso racional da água, cobrança de tarifa pelo uso da água e realização da primeira leitura do hidrômetro.

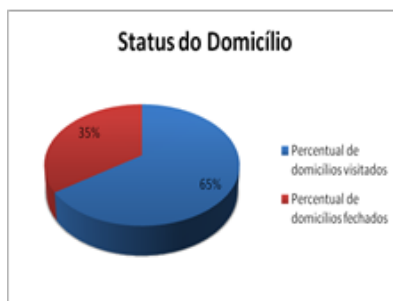
A atividade de campo foi realizada juntamente com os agentes Amigos da Água e contou com a participação de 18 voluntários.

RESULTADOS OBTIDOS (ATALAIA DO NORTE)

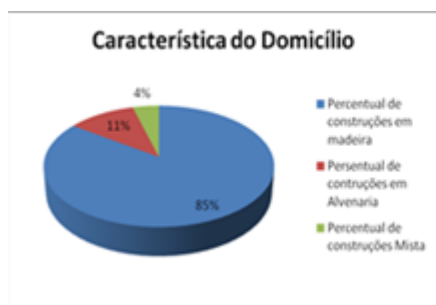
Como amostragem do trabalho realizado nos municípios envolvidos, que são partes do projeto, faz-se a apresentação dos resultados obtidos no município de Atalaia do Norte.

Visita técnica: Existem aproximadamente 1.000 domicílios com hidrômetro instalado na cidade de Atalaia do Norte. A campanha abrangeu 22 ruas, com a realização de visita técnica em 727 domicílios, dos quais 475 receberam orientações sobre o uso racional da água, informação sobre o valor da tarifa de serviço de abastecimento (R\$ 15 até 10m³) e aplicação do formulário de constatação sobre o abastecimento de água no domicílio. E 252 domicílios estavam fechados possibilitando apenas a realização de leitura do hidrômetro. Em áreas de difícil acesso não foi possível à realização da atividade programada.

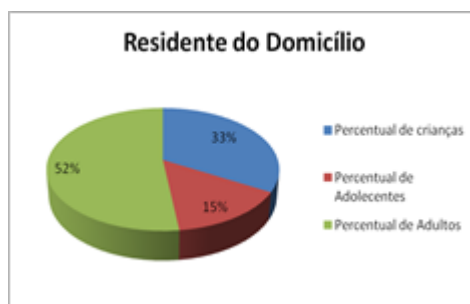
Durante a realização da visita técnica não houve manifestação de recusa da entrevista por parte do residente.



Características do domicílio: Dos 727 domicílios visitados há uma predominância de construções em madeira e localização em área residencial. Consideramos área residencial as ruas que apresentaram na sua maioria ocupações de moradia incluindo as áreas periféricas que abrangem parte da Rua Augusto Luzeiro (conhecida como Portelinha), Beco dos Acreanos, Beco 1º de Maio e Estrada Pedro Teixeira.

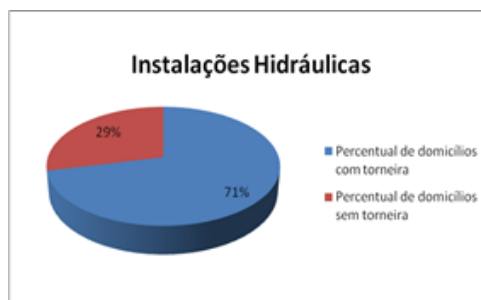


Identificação de residente: Dos 475 domicílios visitados há 2.403 residentes sendo, 801 crianças, 354 adolescentes e 1248 adultos com uma média de 5 a 7 habitantes por residência. Em residências com número de 10 a 15 pessoas são ocupadas por famílias indígenas da etnia Mayuruna, que geralmente abrigam outras famílias que estão de passagem pela cidade.



Características das instalações hidráulicas: Dos 475 domicílios foram identificados 339 com instalação de torneiras e 136 sem torneira. Nas residências sem torneira a água chega ao reservatório, seja do tipo caixa d'água, tanque ou balde por meio da tubulação aberta sem nenhum controle sobre a capacidade de abastecimento, causando desperdício e mau uso da água.

Há necessidade de realizar medidas de prevenção ao desperdício nos domicílios localizados na Estrada Pedro Teixeira, João Batista, Beco dos Acreanos, Beco Augusto Luzeiro (Portelinha) e Rua do Quixito. Nas ruas Antônio Souza Braga, Júlio Maurício e 31 de Maio também se observaram pontos de vazamento dificultando o acesso à água.



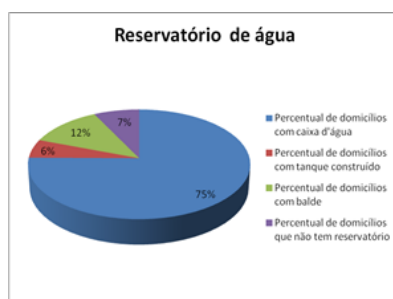
Características das instalações sanitárias: Dos 475 domicílios 105 possuem banheiros com instalações sanitárias e 370 não possuem instalações sanitárias em suas residências. Os domicílios ainda não estão

preparados para receber o novo sistema de abastecimento de água e com isso processo de mudanças das instalações sanitárias adequadas à população ocorrerá em médio prazo. Desta forma, é mínimo o desperdício de água ocorrido pela falta de manutenção e reparos em instalações sanitárias uma vez que 78% dos domicílios visitados não possuem este tipo de estrutura.

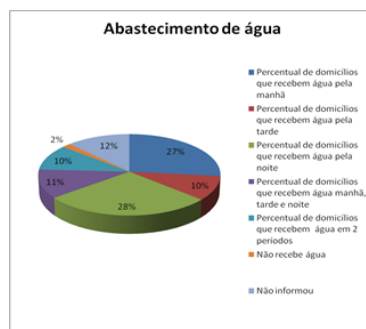


Característica do Reservatório de água: Dos 475 domicílios, 75% possuem caixa d'água e se somados a outros tipos de reservatório totalizam 93% de domicílios com reservatório de água. 7% dos domicílios visitados não possuem nenhum tipo de reservatório e estão localizados no Beco Augusto Luzeiro (Portelinha) e Rua 1º de Março.

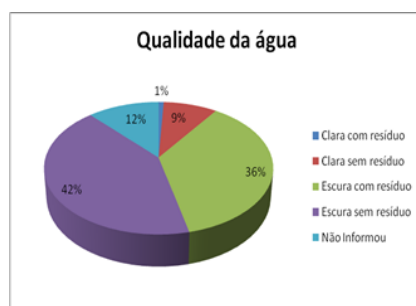
Há necessidade de monitoramento nessas ruas, em decorrência da necessidade de prevenção ao desperdício de água.



Abastecimento de água: Dos 475 domicílios, 28% recebem água a noite. Consideramos um indicador preocupante, tendo em vista que o horário de abastecimento é feito das 18h00min às 06h00min da manhã principalmente nas áreas onde há domicílio sem reservatório de água e sem torneira instalada. 2% dos domicílios que não recebem água do sistema estão localizados no Beco dos Acreanos por trás da olaria e Rua Augusto Luzeiro.



Qualidade da água: Dos domicílios visitados 42% recebem água escura sem resíduo e 36% escura com resíduo totalizando 78% de abastecimento com água fora do padrão de qualidade.



Hidrômetro Instalado: Dos 727 domicílios visitados 5% possui hidrômetros que necessitam de reparos ou substituição. Nas áreas periféricas abrangendo as ruas 31 de Março e 1º de Maio os hidrômetros foram instalados longe das residências dificultando a localização do domicílio. No início da Ponte Marinho Alencar até a metade da ponte, onde estão localizadas moradias em palafitas existem alguns hidrômetros e várias tubulações instalados abaixo da ponte, área que no período da cheia fica completamente alagada. Não foi possível a leitura do hidrômetro nesta localidade.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para darmos seguimento a próxima etapa da atividade que visa à realização da 2ª leitura do hidrômetro e identificar os domicílios que estão usando água acima de 10m³, na qual receberá mais uma vez orientação quanto ao desperdício de água, apresentamos alguns desafios que precisam ser

superados para garantir o êxito esperado nesta campanha de educação ambiental na área de saneamento:

- ✓ O sistema trabalha atualmente com 4 operadores. Por questões salariais nenhum destes funcionários que são pagos pela prefeitura querem assumir a atividade no horário da noite das 18h00min as 06h00minh. Desta forma, a cidade está sendo abastecida com água bruta. Isso explica o resultado negativo sobre a qualidade da água;
- ✓ A administração do sistema não dispõe de ferramenta e materiais hidráulicos para a realização de pequenos reparos de vazamentos em tubulações e hidrômetros. Isso também compromete a prevenção ao desperdício de água;
- ✓ Não há uma definição de escala de dia e hora para o abastecimento as ruas uma vez que o sistema não funciona 24 horas;
- ✓ As instalações de hidrômetros, principalmente no Beco 1º de Maio, foram feitas de forma irregular. Em vários pontos da cidade identificamos hidrômetros em baixo de ponte, embaixo da residência, dentro de bueiro e outros danificados.

Para que a população possa ser conscientizada sobre o desperdício de água é preciso que ela perceba as mudanças que estão sendo realizadas. E para isso o sistema de abastecimento de água necessita de estrutura para garantir a qualidade do serviço.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pelos resultados aqui expostos verificou-se que a campanha abrangeu as ruas do município, com a realização de visita técnica aos domicílios constatando-se que dos domicílios visitados há uma predominância de construções em madeira, material abundante na região, e, que nos domicílios visitados há predominância de adultos e crianças.

Com relação às instalações hidráulicas 29 % dos domicílios visitados não possuíam torneiras o que contribuem para o desperdício.

Com relação às instalações sanitárias 22 % não possuem banheiros com instalações sanitárias e 78 % dos domicílios visitados não possuíam instalações sanitárias em suas residências, contribuindo para a proliferação das doenças tropicais da região e contaminando o lençol freático e manancial da região.

Constatou-se que 93% dos domicílios visitados têm algum tipo de reservatório de água.

Quanto ao Sistema de Abastecimento de Água verificou-se que partes significativas, dos domicílios visitados, só recebiam água a noite e que 78% dos domicílios visitados recebiam água fora dos padrões de potabilidade.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As informações e análises apresentadas no presente trabalho é uma amostragem da grave situação existente nos serviços de saneamento básico nos municípios do interior do estado do Amazonas.

Do ponto de vista da ação imediata, o presente trabalho aporta informações de grande utilidade para orientar a ação dos Governantes, nos níveis do Estado e dos Municípios, de forma a reverter a grave crise por que passa os serviços. Nesse sentido, ações urgentes precisam ser tomadas para assegurar um mínimo de qualidade aos serviços, sobretudo no que diz respeito à garantia de abastecimento e potabilidade da água distribuída. Além disso, no campo financeiro é preciso que os municípios assumam a cobrança pelos serviços prestados à população, sobretudo os de abastecimento de água, de forma contínua e organizada.

Assim, recomenda-se que os Governos do Estado e dos Municípios façam um planejamento conjunto para solucionar as deficiências apresentadas e continuidade dos serviços oferecidos a população

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Campanha de Sensibilização em Educação Ambiental- Saneamento – PRODERAM/AM
2. PMSS - Programa de Modernização do Setor Saneamento. Avaliação Técnico Operacional dos Serviços de Saneamento Ambiental nos Municípios do Interior do Estado do Amazonas. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, Brasília/ DF (2004).

REGISTRO FOTOGRÁFICO

CAPACITAÇÃO DOS AGENTES VOLUNTÁRIOS AMIGOS DA ÁGUA



INICIO DA 4ª CAMPANHA EM EDUCAÇÃO AMBIENTAL - SANEAMENTO



IDENTIFICAÇÃO DE DOMICÍLIOS SEM TORNEIRA



IDENTIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA



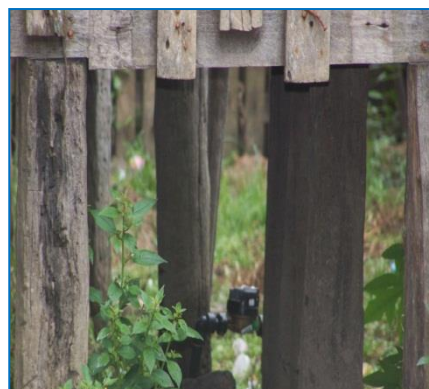
INSTALAÇÕES DE HIDRÔMETROS IRREGULARES



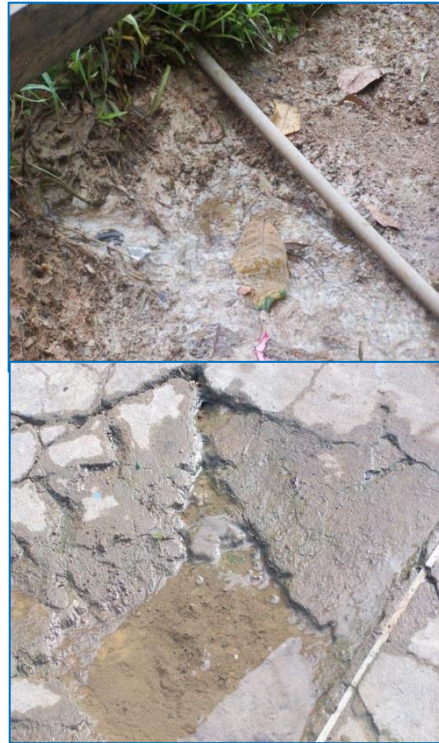
IDENTIFICAÇÃO DE HIDRÔMETROS DANIFICADOS



LOCALIZAÇÃO DE HIDRÔMETROS IRREGULARES



PONTOS DE VAZAMENTO NAS RUAS



Capítulo 6



10.37423/230107139

CARACTERIZAÇÃO DE FILMES DE SERICINA MODIFICADOS COM POLIETILENOGLICOL

Ana Paula Sone

Faculdade Biopark

Joel Cordeiro Júnior

Faculdade Biopark

Maicon Felipe Malacarne

Faculdade Biopark

Gabriel Dequigiovanni

Faculdade Biopark

Marcelino Luís Gimenes

Universidade Estadual de Maringá

Viviane Vanessa Dohl Feiten

faculdade Biopark



Resumo: A sericina é uma proteína natural removida da seda pelo processo de degomagem. A recuperação desta pode agregar valor a este resíduo e minimizar o impacto causado por efluentes não tratados e resíduos sólidos. Biofilmes confeccionados por *casting* utilizando sericina e glicerol como plastificante foram quimicamente reticulados com diferentes concentrações de polietilenoglicol (PEG). Os filmes foram caracterizados através das análises de aspectos visuais, umidade, solubilidade em água e permeabilidade ao vapor d'água. Filmes de sericina produzidos pelo método de reticulação apresentaram levemente amarelos, homogêneos, transparentes e visualmente atrativos onde o glicerol conferiu flexibilidade ao filme. As propriedades dos filmes de sericina dependem das composições utilizadas para formar o filme, que podem ser usadas para alcançar a flexibilidade desejada e minimizar a permeabilidade dos filmes.

1. INTRODUÇÃO

Os biofilmes são produzidos a partir de materiais biológicos, esses materiais possuem a capacidade de se biodegradar, ou seja, pode ser convertidos em compostos simples quando presentes no meio ambiente (Chandra e Rustgli, 1998). Esse processo não ocorre com embalagens plásticas derivadas do petróleo.

Um polímero biodegradável que pode ser utilizado para confecção de biofilmes é a sericina. Sericina é uma proteína globular e solúvel em água que pode ser encontrada nos casulos do bicho-da-seda (*Bombyx mori*), sendo que os casulos são basicamente constituídos de 70-80% de fibroína e de 20-30% de sericina, onde é responsável por manter os fios de fibroína ligados e dando coesão aos casulos (Zhang, 2002). A sericina é extraída pelo processo de degomagem, que pode ocorrer tanto por via física ou química ou, também, por enzimas. Nos estudos realizados por Tomadon Jr. (2011) na obtenção da sericina, foi determinado as melhores condições encontradas para a extração da sericina. Essas condições foram utilizadas por Turbiani (2011) na extração de sericina, para confecção de biofilmes de sericina reticulados com dimetiloluréia.

Na formulação dos biofilmes podem ser incorporados diversos tipos de aditivos, os mais utilizados são os plastificantes, que tem a função de melhorar a flexibilidade e o alongamento dos biofilmes, dessa forma, tornando-os menos quebradiços (Sothornvit e Krochta, 2005). Os agentes reticulantes, que por sua vez tem a função de promover ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, desta forma, podendo melhorar as qualidades mecânicas e a solubilidade dos filmes (Tsenoglou, 1988). O polietilenoglicol pode ser empregado como agente reticulante, de acordo com os parâmetros da Isso 9001:2000 é um composto que possui uma toxidez muito baixa e é estável em condições normal, além de o polietilenoglicol ser expelido do corpo sem ser metabolizado. Em relação ao meio ambiente, esse agente reticulante é solúvel em água, não se acumula no meio ambiente, sendo lentamente biodegradável.

Para produção de biofilmes, a técnica denominada “*casting*” é muito empregada, esta técnica consiste na preparação de uma solução filmogênica e a transferência de quantidades determinadas da mesma para um suporte para ocorrer à formação do filme pela evaporação do solvente (Cavalcanti et al., 2002).

O presente trabalho estudou as propriedades dos biofilmes de sericina reticulados com diferentes concentrações de polietilenoglicol (PEG), produzidos pela técnica “*casting*”. Sendo analisados os

aspectos visuais, a espessura, o conteúdo de umidade, a solubilidade em água e a permeabilidade ao vapor de água.

2. MATERIAIS

Para a confecção dos biofilmes, foi utilizada a proteína sericina proveniente dos casulos do bicho-da-seda, *Bombyx mori*, cedidos pela empresa Fiação de Seda BRATAC S. A. Além da utilização de glicerol como agente plastificante e polietilenoglicol (PEG) como agente reticulante.

3. METODOLOGIA

3.1. MÉTODO DE OBTENÇÃO DA SOLUÇÃO DE SERICINA

A solução de sericina foi obtida em duas etapas. Na primeira etapa, os casulos adquiridos foram cortados em pequenos pedaços (aproximadamente 1 cm²) e posteriormente houve a adição de água destilada na proporção 3:100 (m/v), a extração foi realizada em autoclave com água quente a 120 °C e pressão manométrica de 1 kgf/cm² durante 60 minutos.

A segunda etapa foi à precipitação da sericina na solução através do processo de congelamento, onde a solução de sericina extraída é congelada em freezer a -20 °C durante 24 horas para ocorrer à precipitação. Posteriormente a solução foi retirada do freezer e deixada em temperatura ambiente até descongelar e filtrada a vácuo.

3.2. METODOLOGIA PARA PREPARAÇÃO DOS FILMES

Os filmes foram confeccionados através da técnica de “casting”. Os filmes foram preparados a partir de uma solução filmogênica com fração mássica de sericina (2% m/v) e contendo glicerol (0,6 g de glicerol/g de sericina). Esta solução foi homogeneizada por meio de agitação mecânica a 1000 rpm por 1 hora em um agitador equipado com controlador de temperatura. Posteriormente, a solução foi aquecida a 70 °C e uma solução diluída de polietilenoglicol foi adicionada lentamente à solução filmogênica. Após manter essa solução sobre agitação durante 1 hora, alíquotas de 70 mL da solução filmogênica foram transferidas para placas de polipropileno cm diâmetro de 15 cm, e levadas a uma estufa de circulação de ar a 37 °C por 16 horas para formação dos filmes por evaporação. Todo o fluxograma da metodologia é representado na Figura 1.

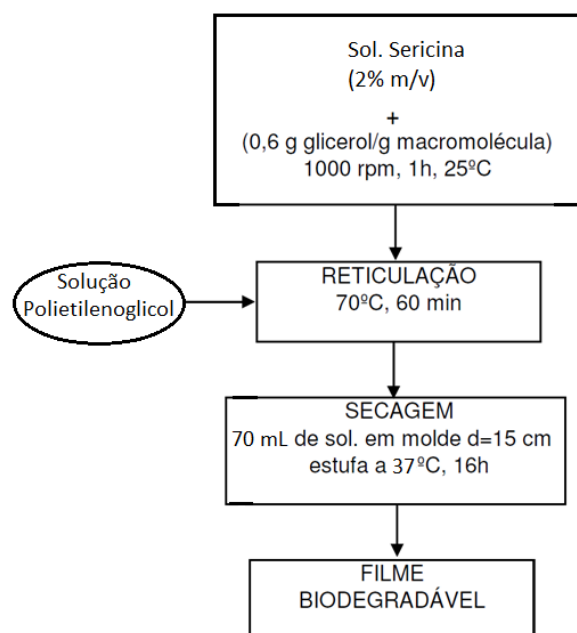


Figura 1 – Fluxograma da confecção dos biofilmes.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS BIOFILMES

Os filmes foram caracterizados avaliando ao aspecto visual, espessura, teor de umidade, solubilidade em água e permeabilidade ao vapor de água. Todas as análises foram realizadas em triplicada para cada formulação de filme.

Antes da caracterização, os filmes foram mantidos em dessecadores para uniformização do conteúdo de umidade, em umidade relativa (UR) de 52%, obtida por uma solução cloreto de sódio, durante três dias.

Aspecto visual: Seguindo os parâmetros estabelecidos por Gontard (1991), citados por Mali (2002), as características que foram verificadas são: continuidade, homogeneidade e manuseabilidade.

Espessura: A espessura foi determinada utilizando um micrômetro externo mecânico (Mitutoyo, modelo 103-137, graduação 0,01 mm). Foram realizadas cinco medidas aleatórias sobre uma área de 9,6 cm² nos ensaios de permeabilidade para o cálculo da espessura final através de uma média aritmética.

Conteúdo de umidade: A determinação da umidade ocorreu a partir da quantificação da massa inicial de amostras circulares dos filmes com diâmetro 2,5 cm, sendo posteriormente submetidos à secagem a 105 °C por 24 h em estufa e a massa seca quantificada novamente. O conteúdo de umidade (w) foi determinado pela Equação 1.

$$\varpi = \frac{(m_i - ms_f)}{m_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde ϖ é a umidade do filme [%], m_i é a massa seca inicial a amostra [g] e ms_f é a massa seca final da amostra [g].

Solubilidade em água: A quantidade de massa solúvel em água foi determinada a partir de amostras circulares de filmes de diâmetro de 2,5 cm. A massa inicial dos filmes foram quantificadas (m_o) e a amostra imersa em excesso de água destilada sobre agitação branda (125 rpm) em uma incubadora refrigerada com agitação sobre as seguintes condições, 25 °C durante 24 horas. Em seguida, a massa seca final (m_f) das amostras foram quantificadas após as amostras serem submetidas à secagem a 105 °C por 24 horas. Pela Equação 2 pode se calcular a quantidade de massa solubilizada.

$$S_w = \frac{m_i(1 - \varpi) - m_f}{m_i(1 - \varpi)} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde S_w é a quantidade de massa solúvel [%], m_i é a massa seca inicial a amostra [g] e m_f é a massa seca final da amostra [g].

Permeabilidade ao vapor de água: De acordo com o método E96-95 (ASTM, 1995b), a permeabilidade ao vapor de água foi determinada gravimetricamente. Foram utilizando pequenas células de teflon e alumínio, onde amostras circulares de filmes com diâmetro de 5 cm foram fixadas como é mostrado na Figura 2. As células permaneceram no interior de um dessecador com 75% UR, obtida por uma solução saturada de cloreto de sódio. O fundo da célula foi preenchido com cloreto de cálcio granular para manter a umidade relativa dentro da célula a 2%. Durante sete dias, as células foram pesadas diariamente com uma balança analítica.



Figura 2 – Células de teflon e alumínio utilizadas na análise de permeabilidade ao vapor de água.

A permeabilidade ao vapor de água (K_{vap}) foi determinado pela Equação 4, sabendo que a área da superfície livre exposta dos filmes para permear o vapor foi 6,9 cm².

$$K_{vap} = \frac{\dot{G} \cdot \delta}{A_e \cdot \Delta P_{H_2O}} \quad (3)$$

Onde K_{vap} é a permeabilidade ao vapor de água [(g.mm)/(m².dia.kPa)], $\dot{G}$ é a taxa constante de ganho de massa [g/dia], δ é a espessura inicial do filme [mm], A_e é a área exposta do filme e ΔP_{H_2O} é a diferença de pressão parcial do vapor de água no ambiente próximo às duas faces do filme na temperatura do teste [kPa].

4. RESULTADOS

Os filmes de sericina com e sem o uso de agente reticulante na sua formulação, apresentaram boas qualidades de flexibilidade ao manuseio, fácil remoção das placas de suporte, levemente amarelados, homogêneos, transparentes e visualmente atrativos.

4.1. ASPECTO VISUAL

As principais características verificadas foram homogeneidade, continuidade e manuseabilidade, sendo que os resultados encontrados são apresentados na Tabela 1. A grande maioria dos filmes apresentaram qualidades adequadas, apesar de suas qualidades exibirem uma menor homogeneidade com o aumento da concentração do agente reticulante.

Tabela 1 – Características relacionadas ao aspecto visual dos filmes confeccionados

Teor de Polietilenoglicol (g PEG/g sericina)	Homogeneidade	Continuidade	Manuseabilidade
0,0	A	A	A
0,1	A	A	A
0,4	A	A	A
0,7	B	A	A

Nota: A – excelente, B – boa e C - deficiente.

4.2. UMIDADE E SOLUBILIDADE EM ÁGUA

De acordo com a Tabela 2, pode se notar que o conteúdo de umidade para as diferentes formulações de filmes apresentaram uma evidente variação com a quantidade de agente reticulante empregada nos filmes. Os valores encontrados são maiores do que os valores encontrados por Bierhalz (2010) que estudou filmes de pectina e pectina BTM/alginato reticulado com cálcio e Norajit et al. (2010) que analisou filmes de alginato contendo extrato de ginseng.

Tabela 2 – Umidade e solubilidade em água dos filmes confeccionados

Teor de Polietilenoglicol (g PEG/g sericina)	ϖ [g/100g _{filme}]	S_w [%]
0,0	17,85 ± 0,42	17,87 ± 0,15
0,1	18,09 ± 0,92	15,91 ± 1,39
0,4	27,65 ± 1,35	8,79 ± 0,93
0,7	30,62 ± 0,36	3,43 ± 0,27

Nota: Média ± Desvio Padrão.

Os valores encontrados para a quantidade de massa solúvel dos filmes são menores dos encontrados por Turbiani (2011) que trabalhava com biofilmes de sericina reticulados com dimetiloluréia. Pode se notar a redução da massa solúvel dos filmes com o aumento da quantidade de agente reticulante utilizado, esse mesmo efeito foi encontrado por Turbiani (2011) também e por Zactiti e Kieckbusch (2006) que analisaram filmes de alginato de sódio reticulados com CaCl₂.

4.3. PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA E ESPESSURA

Os filmes confeccionados possuem espessuras (δ) por volta de 0,12 ± 0,01 mm e 0,19 ± 0,01 mm, como apresentam na Tabela 3.

Tabela 3 – Permeabilidade ao vapor água e espessura dos filmes confeccionados

Teor de Polietilenoglicol (g PEG/g sericina)	δ [mm]	K_{vap} [(g.mm)/(m ² .dia.kPa)]
0,0	0,12 ± 0,00	2,63 ± 0,07
0,1	0,12 ± 0,01	3,65 ± 0,51
0,4	0,15 ± 0,01	7,11 ± 0,49
0,7	0,19 ± 0,01	14,62 ± 0,70

Nota: Média ± Desvio Padrão.

Os valores encontrados para a permeabilidade ao vapor de água são valores próximos aos encontrados por Turbiani (2011) para os filmes de sericina reticulados com dimetiloluréia. Os valores da permeabilidade dos filmes sem agente reticulante e com uma proporção de 0,1 (g PEG/g sericina) também se aproximam aos valores encontrados por Bierhalz (2010) para filmes de pectina BTM e pectina BTM/alginado reticulados com cálcio.

Deve-se notar também que a permeabilidade ao vapor de água encontrada aumenta conforme o aumento da quantidade de agente reticulante empregado, sendo o contrário do que no trabalho de Turbiani (2011) que também envolve sericina. Acreditamos esse fato seja devido a presença de grupamentos –OH no polietilenoglicol, que não estão presentes no dimetiloluréia. Grupamentos como –OH, –NH e –COOH, todos os três presentes na sericina, regulam a absorção de água na monocamada (Miyake *et al.*, 2003). Considerando essa informação, pode ser concluído que o aumento dos grupos hidrofílicos provocados pela adição de polietilenoglicol, pode ter causado esse aumento na permeabilidade ao vapor de água com o aumento do agente reticulante.

5. CONCLUSÃO

Os filmes de sericina confeccionados apresentaram bons aspectos visuais, sendo homogêneos, levemente amarelos, transparentes, ter boa flexibilidade e ser fácil de manusear.

O resultado obtido para as análises de solubilidade e permeabilidade ao vapor de água apresentaram valores próximos aos encontrados na literatura. Porém o comportamento dos resultados da permeabilidade ao vapor de água em relação à adição de agente reticulante foi contrário ao encontrado na literatura. Para a confirmação das teorias levantadas, devem ser realizadas mais análises, como espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X, para obter um maior conhecimento da morfologia dos filmes e como ocorreu o processo de reticulação.

6. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 9001/2000: Sistemas de Gestão da Qualidade. Rio de Janeiro, 2001.
- ASTM. Standard test methods of water vapor transmission of materials. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, E 96-95, 1995b.
- BIERHALZ, A. C. Confeção e caracterização de biofilmes ativos à base de pectina BTM e de pectina BTM/alginato reticulados com cálcio, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Tese de Mestrado, 2010.
- CAVALCANTI, O. A., VAN DEN MOOTER, G., CARAMICO-SOARES, I., KINGET, R. Polysaccharides as excipients for colon-specific coatings. permeability and swelling properties of casted films. *Drug Dev. Ind. Pharm.*, New York, v.28, n. 2, p. 157-164, 2002.
- CHANDRA, R.; RUSTGI, R. Biodegradable polymers. *Progress in Polymers Science*, v. 23, p. 1273-1335, 1998.
- MIYAKE, H.; WAKISAKA, H.; YAMASHITA, Y.; NAGURA, M. Moisture characteristic and structure of high molecular weight sericin films. *Polymer Journal*, v. 35, n. 8, p. 683-687, 2003.
- NORAJIT, K.; KIM, K. M.; RYU, G. H. Comparative studies on the characterization and antioxidant properties of biodegradable alginate films containing ginseng extract. *Journal of Food Engineering*, v. 98, p. 377-384, 2010.
- SOTHORNVIT, R., KROCHTA, J. M. Plasticizers in edible films and coatings. Ed. HAN, J. H. In: *Innovations in Food Packaging*. Elsevier, 2005.
- TOMADON JR., J. Obtenção da proteína sericina, com alta massa molecular, a partir de casulos Bomxy mori. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, Tese de Mestrado, 2011.
- TSENOGLOU, C. Rubber elasticity modulus of interpenetrating heteropolymer networks. In: DICKIE, R. A.; LABANA, S.S.; BAUER, R.S. *Cross-linked polymers: Chemistry, Properties and Applications*. Washington: American Chemical Society, p. 60-61, 1988.
- TURBIANI, F. R. B. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis de sericina e PVA reticulados com dimetiloluréia. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, Tese de Doutorado, 2011.
- ZHANG, Y. Q. Application of natural silk protein sericin in biomaterials. *Biotechnology Advances*, v. 20, p. 91-100, 2002.

Capítulo 7



10.37423/230207182

PRODUTIVIDADE DO PIMENTÃO VERMELHO EM FUNÇÃO DE L MINAS DE IRRIGAÇÃO E TIPOS DE ADUBAÇÕES

Mateus Batista Granja

Universidade Federal de Campina Grande

Caciana Cavalcanti Costa

Universidade Federal de Campina Grande

João Batista Dos Santos

Universidade Federal de Campina Grande

Marinês Pereira Bomfim

Universidade Federal de Campina Grande

Laíza Gomes de Paiva

Universidade Federal de Campina Grande

Denise Campos Nunes de Farias

Universidade Federal do Vale do São Francisco



RESUMO: O manejo adequado da água de irrigação e da adubação são fatores determinantes para um bom desenvolvimento e produtividade das culturas, bem como para a conservação dos recursos naturais e maior eficiência na utilização dos insumos ao longo do ciclo de produção. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de lâminas de irrigação e tipos de adubação sobre o desenvolvimento e produção do pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L.). O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Fazenda experimental da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar (CCTA), localizada no município de São Domingos-PB. Foi adotado o delineamento experimental em blocos casualizados com os tratamentos em parcelas subdivididas, sendo as parcelas constituídas por quatro lâminas de irrigação (60%, 80%, 100% e 120%), calculadas em função da evapotranspiração de referência para a localidade e as subparcelas constituídas por três tipos de adubação: orgânica (100% esterco bovino), organomineral (50% esterco bovino e 50% de NPK) e 100% mineral (100% de NPK), em quatro repetições. O uso das lâminas de irrigação deficitárias (60% e 80%) não foram prejudiciais ao desenvolvimento da cultura desde que adotados manejos de irrigação mais frequentes; o uso da lâmina de 120% não proporcionou benefícios significativos na produtividade da cultura; a utilização das fontes de adubação orgânicas elevaram a produtividade da água pela cultura e aumentaram seu desempenho sobre as variáveis massa fresca e seca dos frutos e produtividade da cultura.

Palavras-chave: *Capsicum annuum* L., evapotranspiração, esterco bovino.

INTRODUÇÃO

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é considerado uma das dez espécies de maior importância econômica no mercado mundial e brasileiro de hortaliças. No país é uma das mais difundidas e consumidas na forma *in natura* (BLAT et al, 2007).

Sua relevância no mercado é devido à presença de substâncias químicas que conferem sabor, aroma e cor aos alimentos, além de ser uma importante fonte de vitamina C e A (FONTES, 2005). Tais atributos tornam esta hortaliça bem aceita pelos consumidores, uma vez que apresenta boa versatilidade de uso na culinária (SOUZA, 2017) e na agroindústria.

De acordo com o levantamento de dados socioeconômicos da cadeia produtiva de hortaliças, no ano de 2012, o valor da produção de pimentão foi de R\$ 567 milhões (ABCSEM, 2012). Segundo dados do IBGE (2017), no mesmo ano, o país colheu 253.807 toneladas, demandando grande quantidade de força de trabalho e gerando empregos, principalmente na agricultura familiar.

Em regiões semiáridas, a elevada taxa de evapotranspiração, estações chuvosas irregulares e chuvas mal distribuídas, tornam o cultivo de determinadas culturas uma atividade desafiadora. Sob essas condições, o uso da irrigação é uma ferramenta indispensável para a viabilidade econômica de culturas mais exigentes, como a grande maioria das hortaliças, em especial o pimentão.

É comum nessas regiões o esgotamento ou o difícil acesso às fontes hídricas, principalmente nos meses de seca, fazendo-se necessário o uso de técnicas em conjunto que propiciem maior economia da água e a eficiência no uso deste recurso.

Desta forma, o manejo racional da irrigação deve ser feito visando fornecer água às plantas em quantidade suficiente para prevenir o estresse hídrico, favorecendo incremento de produtividade e qualidade da produção, minimizando o desperdício de água, a lixiviação de nutrientes e a degradação do meio ambiente. Isso envolve a tomada de decisões em momentos que se precisa saber quando e como irrigar em quantidades que possam ser armazenadas no solo, na camada correspondente à zona radicular, e em intervalos suficientes para atender à demanda de água das plantas (MAROUELLI et al., 2011).

Assim, como o correto fornecimento da água por meio de sistemas eficientes e bem manejados o uso conservacionista do solo e a utilização de materiais orgânicos na adubação podem ser utilizados para potencializar a disponibilidade de água no solo para as plantas. Segundo Donato et al. (2014), além dos nutrientes, o incremento de matéria orgânica melhora as propriedades físicas do solo, uma vez que aumenta a micro e macrofauna edáfica, melhora ou mantém a porosidade e, em consequência disso aumenta o fluxo difusivo de nutrientes e a absorção destes pelas plantas.

Para o cultivo do pimentão é exigida alta fertilidade do solo e boa disponibilidade de água ao longo de todo o seu ciclo. Desta forma, compreender a inter-relação acerca da cultura, dos insumos utilizados, da água e do ambiente de produção, é de fundamental importância para se estabelecer sistemas produtivos cada vez mais eficientes e racionais, que se expressarão através de resultados satisfatórios na produtividade, qualidade do produto, lucros e sustentabilidade da atividade dentro de um parâmetro socioambiental.

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de lâminas de irrigação e tipos de adubação sobre o desenvolvimento e produção do pimentão vermelho 'Rubi Gigante'.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na Fazenda Experimental do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande no município de São Domingos-PB. A sede municipal está localizada na latitude de 06° 48' 49" S, longitude de 37° 56' 31" W e altitude de 190 m. O clima é classificado como do tipo "BSh", de acordo com classificação climática de Köppen (FRANCISCO & SANTOS, 2018), que representa clima semiárido quente, caracterizado por escassez de chuvas e grande irregularidade em sua distribuição; forte insolação; temperaturas médias elevadas; altas taxas de evaporação e baixa umidade relativa do ar.

O trabalho foi realizado em casa de vegetação do tipo arco, com tET_o revestido com filme de polietileno leitoso de 0,15 mm de espessura e fechamento lateral com tela de 30% de sombreamento. Com dimensões de 20 m de comprimento por 8,0 m de largura e pé direito de 4,0 m de altura, totalizando uma área de 160 m² (Figura 1). No solo não existe revestimento; também foi instalado um sistema de drenagem composto por uma vala simples escavada na bordadura externa da casa de vegetação, com a finalidade de evitar a entrada de água subsuperficial nas parcelas.

Adotou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso com os tratamentos distribuídos em parcelas subdivididas. Os tratamentos estudados consistiram da combinação de quatro lâminas de água de irrigação (parcelas) e três tipos de adubação (subparcelas). As lâminas de água de irrigação foram determinadas com base em diferentes níveis de reposição (60%, 80%, 100% e 120%) da evapotranspiração de referência mensal acumulada obtida por meio do valor tabelado de (HARGREAVES, 1974) para a localidade. Os tipos de adubação utilizados foram: 100% orgânica (esterco bovino); 50% orgânica e 50% mineral (organomineral) e 100% mineral.

As unidades experimentais consistiram em dezesseis parcelas distribuídas em quatro blocos e dimensionadas com 0,5 m de largura por 6,0 m de comprimento. Dentro de cada parcela, foram

alocadas três subparcelas medindo 0,5 m de largura por 2,0 m de comprimento, totalizando 48, que por sua vez, continham cinco plantas cada uma.

O solo da área experimental foi preparado por meio de uma aração utilizando arado de aiveca com tração animal e em seguida as leiras levantadas manualmente com uso de uma enxada. As leiras possuíam 40 cm de base, 20 cm de crista e 6 m de comprimento.

Para a formação das mudas utilizou-se sementes da cultivar Rubi Gigante, as quais foram semeadas em bandejas de poliestireno expandido de 128 células, preenchidas com substrato comercial Basaplan[®], alocando-se três sementes por célula, onde quinze dias após o semeio foi realizado o desbaste deixando-se apenas uma plântula por célula. As mudas foram transplantadas aos trinta e seis dias após a semeadura (DAS), quando a maioria apresentou 12 cm de altura.

Um dia antes do transplântio foi aplicado via foliar o fertilizante mineral misto AJIFOL[®] Premium contendo: 25 g L⁻¹ de N; 12,5 g L⁻¹ de K₂O; 2,5 g L⁻¹ de B; 6,26 g L⁻¹ de Mn; 1,25 g L⁻¹ de Mo; e 87,5 g L⁻¹ de Zn. A concentração aplicada foi de 1 mL L⁻¹ de água. As mudas foram transplantadas ao final da tarde no espaçamento de 0,80 m entre linhas e 0,40 m entre plantas. Conforme o croqui da área experimental (Figura 2).

Após o preparo da área, as subparcelas que receberam o adubo orgânico na fonte esterco bovino, foram adubadas 10 dias antes da instalação da cultura, quando a dose total foi adicionada ao solo, sendo está distribuída e incorporada na camada superficial de 0-15 cm do canteiro. As quantidades de esterco foram calculadas com base na recomendação de nitrogênio para a cultura, conforme Cavalcanti et al. (2008), sendo a dose de 100% calculada utilizando a fórmula de Furtini Neto et al. (2001), utilizando-se a expressão $X=A/(B/100.C/100.D/100)$.

Onde: X = dose de fertilizante orgânico a ser aplicada, kg ha⁻¹; A= dose de N requerida pela cultura, kg ha⁻¹; B= teor de matéria seca do fertilizante orgânico, %; C=teor de N na matéria seca do fertilizante orgânico, %; D= índice de conversão de N da forma orgânica para a forma mineral. Para o índice de conversão utilizou-se o valor de 50%, conforme Ribeiro et al. (1999). Desta forma, foi utilizado a dose de 0,668 kg de esterco planta⁻¹ para os tratamentos 100% orgânicos e 0,334 kg de esterco planta⁻¹ para as subparcelas organominerais.

A adubação mineral foi realizada com base na análise de solo (Tabela 1) e calculada conforme a recomendação para a cultura (CAVALCANTI et al., 2008). Para tanto, considerou-se na adubação de plantio, 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Nas adubações de cobertura aplicou-se 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 40 kg ha⁻¹ de potássio, parcelados em três vezes aos 25, 45 e 60 dias após o transplântio das mudas. Como fontes de nitrogênio, fósforo e potássio, foram utilizados ureia,

superfosfato triplo e clorET_o de potássio, respectivamente. As adubações organominerais foram aplicadas concomitantemente às adubações orgânicas e minerais isoladas.

Para as lâminas de irrigação, a necessidade de água diária aplicada (Etc) foi calculada com base na evapotranspiração de referência (ET_o) mensal acumulada durante o período de condução do experimento para a cidade de Pombal – PB seguindo os valores calculados por Hargreaves (1974) e no coeficiente da cultura (K_c), para cada fase do seu ciclo fenológico de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977), onde na fase inicial o valor adotado foi de 0,4, durante 20 dias; quando passou a ser de 0,6, por 66 dias e 1,1 até o final da última colheita.

Para cada tratamento, as irrigações foram aplicadas seguindo diferentes tempos de funcionamento das linhas laterais com gotejadores em cada parcela em função da vazão média dos gotejadores, do espaçamento entre eles e sua eficiência. Estas foram aplicadas a partir dos 20 dias após o transplântio (DAT). Até esse período foi estabelecido a mesma lâmina de 100% para todos os tratamentos visando a uniformidade no desenvolvimento inicial das mudas. Na medida em que atingia a lâmina desejada as linhas de irrigação eram fechadas por meio de registros individuais. O cálculo do tempo de funcionamento do sistema de irrigação para cada lâmina foi obtido através da seguinte equação: $TI = (\text{Etc} \cdot \text{Eg} \cdot \text{El}) / q \cdot \text{ef}$. Em que: TI – tempo de irrigação em horas; Etc – Lâmina de água a ser aplicada em mm; Eg – Espaçamento entre gotejadores na linha (0,4 m); El – Espaçamento entre linhas laterais (0,8 m); q – Vazão média dos gotejadores (L h^{-1}); ef – eficiência de aplicação dos emissores (95%).

As lâminas de irrigação totais aplicadas (Etc) após a instalação da cultura nos tratamentos de 60, 80, 100 e 120% de reposição da ET_o podem ser visualizadas na Figura 3.

As plantas foram conduzidas em sistema de tutoramento utilizando-se estacas de madeira e fitas tipo fitilho e três hastes sendo eliminadas as demais na medida em que surgiam. As primeiras flores (relativa ao primeiro internódio) de cada planta foram retiradas a fim de evitar que o desenvolvimento excessivo desse primeiro fruto e posterior dano pelo contato com o solo.

O sistema de irrigação localizado foi constituído de uma tubulação secundária (PVC) com 35 mm de diâmetro, linhas laterais simples de tubo de polietileno de 16 mm e gotejadores do tipo “online”, autocompensantes distanciados 0,4 m entre si, com vazão de $5,5 \text{ L h}^{-1}$, um por planta, totalizando 15 gotejadores por linha lateral. No início de cada linha lateral um registro permitia controlar as lâminas de água aplicadas nas parcelas, conforme os tratamentos. O sistema de bombeamento era constituído de eletrobomba e a fonte hídrica que abastecia o sistema oriunda de um poço tubular.

As irrigações eram procedidas diariamente com a lâmina total fracionada, sendo a aplicação de 50% da lâmina requerida pela manhã e 50% ao final da tarde. De acordo Aragão Júnior et al. (1991) o

manejo de irrigação com aplicações frequentes condiciona o solo a manter-se com ótimo teor de água, favorecendo o desenvolvimento da cultura e consequentemente maior produtividade.

Durante a condução do experimento foram realizadas pulverizações preventivas com fungicida cúprico e os inseticidas do grupo químico das Abamectinas para o controle do ácaro-branco (*Polyphagotarsonemus latus*) e neonicotinoides para mosca-branca (*Bemisia tabaci* raça B).

O controle de plantas daninhas foi feito manualmente ou com o auxílio de ancinho e enxada, sendo esta última utilizada apenas entre as leiras.

Ao longo do experimento foram realizadas cinco colheitas, sendo iniciada na décima quinta semana após o transplantio (106 dias após o transplantio-DAT) e finalizadas na vigésima quinta semana (180 DAT). As colheitas eram iniciadas no período da manhã sendo esta realizada quando os frutos atingiam pelo menos 80% da casca com coloração vermelha das plantas centrais de cada subparcela. Para facilitar a coleta dos frutos sem danificá-los, foram utilizadas tesouras de poda, sendo em seguida alocados em sacos de papel identificados para cada tratamento e encaminhados para o laboratório.

Para a caracterização química do solo (Tabela 1) foram coletadas amostras na área experimental na profundidade de 0-20 cm para a realização das análises de rotina, seguindo a metodologia da Embrapa (DONAGEMA et al., 2011).

Características avaliadas foram: Altura de plantas - Foram feitas medições das plantas aos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 e 135 DAT das mudas, avaliando-se três plantas úteis por subparcela. As medições (cm) foram feitas desde o nível solo até o ápice da haste mais alta utilizando-se uma trena; Diâmetro do caule – Foram feitas medições (mm) aos 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 DAT das mudas utilizando-se um paquímetro digital de precisão 0,01 mm, colocado na base do caule a uma altura de aproximadamente 2 cm do solo; Número de frutos – Os frutos foram colhidos e separados em comercial (sadios) e não comercial (com sintomas de doenças, anomalias fisiológicas, ataque de pragas) e contados.; Massa fresca dos frutos - Os frutos foram pesados com auxílio de uma balança digital e o seu valor expresso em g planta⁻¹; Massa seca dos frutos - Após a pesagem e registro da massa fresca, os frutos foram cortados transversalmente, alocados em sacos de papel *kraft* e colocados em estufa com ventilação forçada de ar a 70° C até obter peso constante. Após a retirada dos frutos da estufa, estes foram pesados em uma balança semianalítica e seu valor expresso em gramas planta⁻¹; Produtividade – Utilizando o resultado da massa fresca dos frutos para cada tratamento após cinco colheitas, a produtividade foi calculada em t ha⁻¹ e Produtividade da água - A produtividade da água foi calculada ao final de cinco colheitas sendo determinada pela razão entre

produção final da cultura, expressa em kg ha^{-1} e a lâmina de irrigação total utilizada durante todo o ciclo da cultura após o transplantio em milímetros.

Para a análise estatística foi utilizado o programa AgroEstat sendo os dados submetidos à análise de variância, empregando-se o teste F ao nível de 5% de probabilidade. Nos casos de significância para as adubações, realizou-se teste de médias através do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade e para as lâminas de irrigação a análise de Regressão pelo programa SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 representa o comportamento da altura de planta ao longo das épocas de avaliação realizadas. Observa-se que as plantas de pimentão apresentaram um crescimento inicial lento até os 45 DAT, intensificando-se até os 90 DAT, quando se estabilizaram, independentemente do tipo de adubação utilizada, em torno dos 43,5 cm de altura, até os 120 DAT. Valor abaixo do intervalo de 75-150 cm de altura descrito por Lima et. al (2006) para o pimentão na mesma condição de cultivo. O reduzido porte da cultura ocorreu devido a realização da capação do meristema apical para indução dos ramos laterais com o intuito de padronizar a condução das plantas em 3 hastes.

Na comparação entre as médias pelo teste Tukey a 5% (Tabela 2), as duas maiores médias no diâmetro das plantas foram constatadas na lâmina de água de irrigação de 60 e 120 %. Aos 15 DAT, verifica-se que sob a lâmina de 60% de reposição da ET_0 (irrigação deficitária), que as plantas que receberam adubação organomineral e orgânica apresentaram maior diâmetro quando comparado com a fonte mineral isolada, demonstrando que neste nível de estresse, a fração orgânica presente nessas adubações se apresentou com caráter condicionante do solo, amenizando os efeitos do déficit hídrico e elevando a eficiência do uso da água pelas plantas, provavelmente pela manutenção da água no bulbo molhado por mais tempo.

Ainda aos 15 DAT (Tabela 2), observa-se que a utilização da fonte de adubação com 100% mineral combinada à lâmina de reposição de 120% da ET_0 apresentou a maior média para o diâmetro do caule das plantas, indicando que este tipo de fertilizante apresenta uma maior tendência a expressar seu potencial nutritivo às plantas sob maiores disponibilidades de água no solo.

Aos 30 DAT as plantas demonstraram respostas semelhantes à avaliação anterior, porém não diferiram entre si nos níveis de reposição de 120% da ET_0 . A utilização da menor lâmina de reposição (60%) combinada às adubações organomineral e 100% orgânica apresentaram respostas superiores à adubação 100% mineral (Tabela 2).

Analisando o fator lâmina de irrigação isoladamente (Tabela 3) verifica-se que os tratamentos apresentaram efeito significativo, apenas nas duas últimas avaliações, onde a lâmina de 120% favoreceu o aumento no diâmetro do caule das plantas em relação aos demais tratamentos, porém não diferiram significativamente das lâminas de água de irrigação de 100%.

Santana et al. (2004) avaliaram o efeito de diferentes tensões de água no solo (10, 30, 50 e 60 kPa) para o pimentão e verificaram que o diâmetro do caule das plantas foram maiores quando a irrigação foi realizada com menor tensão de água no solo.

A Figura 4 apresenta o desenvolvimento do diâmetro do caule das plantas de acordo com as épocas de avaliações realizadas. Observa-se que a lâmina de água de irrigação L4 (120% da ET_o) proporcionou as maiores médias ao longo de todas as avaliações, demonstrando que o maior fornecimento de água foi benéfico ao desenvolvimento da planta. Observa-se ainda que as lâminas de 100% e 60% apresentaram desempenho semelhante e não diferiram entre si da lâmina de 80% conforme observado por Padrón et al. (2015) que não verificaram diferenças significativas no diâmetro do caule de pimentão ao avaliar lâminas de reposição da ET_o de 100, 80 e 60%.

O fato de não ter ocorrido diferença significativa sobre o resultado final do número de frutos de pimentão para o fator tipos de adubações pode indicar que as três fontes utilizadas apresentaram fornecimento equilibrado de nutrientes para as plantas ao longo do ciclo. Dessa forma, a utilização da fonte orgânica, seja ela isolada ou como complemento a adubação mineral, torna-se uma interessante alternativa para a fertilização não convencional do pimentão, pois viabiliza ainda mais o cultivo, visto que estes resíduos são de baixo custo e muitas vezes são produzidos dentro das próprias propriedades rurais.

Quanto às lâminas de irrigação, apesar dos diferentes volumes de água aplicados aos tratamentos, a não significância sobre a variável analisada foi, possivelmente ocasionada em função do manejo da irrigação utilizado durante a condução do experimento, tendo em vista que ao adotar-se uma maior frequência de irrigação com turno de rega diário e a lâmina fracionada em duas irrigações, a capacidade de campo do solo manteve-se em uma faixa de umidade favorável à cultura, de forma que mesmo com a menor lâmina (60% da ET_o) de água de irrigação não ocasionou déficit hídrico provocando abortamento de flores e queda de frutos.

De acordo com Padrón et al. (2015) a cultura do pimentão irrigada com uma maior frequência tende a ser mais eficiente quanto ao uso da água, sem afetar seu rendimento, comparado a um cultivo irrigado com menor frequência. Dessa forma, a adoção de manejo de irrigação mais frequentes com a

lâmina de irrigação deficitária podem ser utilizados para a produção de pimentão vermelho nas regiões semiáridas em épocas de baixa disponibilidade hídrica.

Comparando-se as médias da massa fresca dos frutos das plantas de pimentão vermelho, obtidas por tratamento pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, observa-se que o uso do esterco bovino como fonte da adubação orgânica proporcionou resposta superior à adubação com 100% mineral, porém não diferiu da adubação organomineral (Figura 6).

O melhor desempenho das fontes orgânicas em vista à adubação mineral pode ser explicado em decorrência dos efeitos benéficos da matéria orgânica adicionada ao solo. Zavattaro et al. (2017) afirmam que a adição de esterco no solo aumenta em 33% o teor de carbono orgânico comparado com a fertilização mineral, o que contribui para uma maior massa fresca dos frutos.

A análise de regressão mostrou que os dados da massa seca dos frutos se ajustaram ao modelo de regressão linear, em função das lâminas de água de irrigação para a reposição da ET_0 . Observa-se que o maior valor de massa seca dos frutos sobre o resultado final das cinco colheitas foi obtido com a utilização da maior lâmina de reposição (120%) seguido da lâmina de 100% (Figura 7).

Resultados semelhantes foram observados por Santos (2018) que, ao avaliar a demanda hídrica de plantas de pimentão cultivado em vasos em ambiente protegido, constatou que os maiores valores de massa seca dos frutos foram obtidos com a lâmina de 100% e 105% da ET_0 e os menores nas lâminas de 70% e 80%.

De acordo com Silva et al. (2018), plantas em condições de déficit hídrico ou restrição hídrica apresentam área foliar reduzida influenciando diretamente na produção de massa seca em diversas partes da planta.

Na comparação entre as médias obtidas pelo teste Tukey a 5% observa-se que a utilização do esterco bovino (adubação orgânica) isolado ou combinado ao adubos minerais (organomineral) proporcionou maior acúmulo de massa seca nos frutos de pimentão vermelho em relação à adubação 100% mineral (Figura 8).

Isso se deve, possivelmente, aos efeitos da matéria orgânica no solo, pois além dos atributos mitigantes ao estresse hídrico, os adubos orgânicos preservam a capacidade produtiva do solo, apresentam maior efeito residual e o acúmulo de nutrientes contribui para um maior acúmulo de matéria seca nos frutos.

PRODUTIVIDADE

Avaliando os fatores isolados, observa-se que a utilização das diferentes lâminas de irrigação não diferiram estatisticamente entre si sobre o resultado final da produtividade da cultura, de forma que tanto o incremento de 20% como as reduções de 20% e 40% da reposição plena da evapotranspiração da cultura não propiciaram melhoras expressivas na produtividade, como também não foram suficientes para prejudicar a produção de frutos por área, sendo possivelmente influenciada pela frequência de irrigação adotada no experimento.

De acordo com Rebouças Neto et al. (2017), a utilização de irrigações mais frequentes e com menores volumes de água, proporciona às plantas menor ou nenhum estresse hídrico no solo, com isso a produção e a qualidade dos frutos não são prejudicadas.

Resultados semelhantes foram observados por Padrón et al. (2014) ao avaliar frequências e taxas de irrigação na cultura do pimentão, constatou que a frequência de irrigação diária resultou em melhor desempenho da cultura e ocasionou rendimentos semelhantes na utilização das lâminas de 60, 80 e 100% de reposição da Etc.

Tais resultados são relevantes para áreas agrícolas sujeitas ao déficit hídrico, como as regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, tendo em vista que os efeitos negativos do uso de lâminas de irrigação inferiores às requeridas puderam ser amenizados através do manejo da irrigação com maior frequência, não ocasionando prejuízos ao desempenho da cultura e contribuindo para a economia de água ao longo de todo o cultivo.

Em relação ao efeito da adubação, os tratamentos com 100% de adubação orgânica com a fonte esterco bovino a adubação organomineral com 50% esterco bovino e 50 % da adubação mineral nas fontes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, não diferiram estatisticamente, com produtividades de 15,54 e 14,44 t ha⁻¹, respectivamente. A menor produtividade foi obtida com as plantas quando realizou-se somente adubação 100% mineral, que diferiu estatisticamente da adubação 100% orgânica, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, apresentando a média de 13,88 t ha⁻¹ (Figura 9). Analisando as médias dos tratamentos, observa-se que houve um incremento de 7% em relação a adubação organomineral e 10,7% em relação a adubação mineral.

Segundo Silva (2018), uma vantagem do esterco bovino sobre os fertilizantes sintéticos é que além do fornecimento de N e de outros nutrientes, pode ocorrer uma melhoria em uma série de atributos químicos e físicos do solo, como teor de matéria orgânica, CTC, pH do solo, agregação, porosidade e densidade do solo, entre outros, como reduzindo a degradação e aumentando a estabilidade da

estrutura do solo que é uma das características mais desejáveis para manter a produtividade agrícola e preservar a qualidade do meio ambiente.

Resultados semelhantes foram observados por Andrade & Neto (2018) ao compararem a produtividade do tomate cereja adubado com NPK e esterco de aves verificaram que a fonte orgânica se destacou tanto em crescimento quanto em produtividade, além de resultar em frutos maiores e que a utilização da produção orgânica pode ser uma opção viável com ótimo custo benefício, podendo trazer resultados tão satisfatórios quanto à adubação mineral.

Na Figura 10, observa-se a variação dos dados médios observados da produtividade da água obtidos com as médias ajustada a equação de regressão polinomial, em função da variação de lâminas crescentes de irrigação com base na evapotranspiração total da cultura (mm), sendo o modelo quadrático o que melhor se ajustou aos valores de *WP*. Os resultados demonstram que as maiores *WP* são observadas para a lâmina de irrigação deficitária de 60% de reposição da ET_o ($35,55 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), correspondente ao volume de água acumulado de 445,66 mm e decresceu na medida em que se aumentou o fornecimento de água às plantas, diferindo em nível de probabilidade de 1% dos demais tratamentos, que foram de $27,33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para a lâmina de 80%, $21,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para a lâmina de 100% e $20,34 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, com seus respectivos volumes de água acumulados de 577,06 mm; 708,45 mm e 839,85 mm.

A maior produtividade da água foi obtida com estratégias de irrigação deficitária, podendo esta ser uma alternativa na gestão de recursos hídricos para aumentar a eficiência do uso da água e ser utilizada em situação com limitação hídrica. Desta forma, o uso deste parâmetro constitui-se de uma fonte valiosas de informações a serem utilizadas nos modelos de tomada de decisão, permitindo aperfeiçoar o uso dos fatores envolvidos na produção, proporcionando benefícios como redução dos custos de irrigação e redução dos riscos associados aos impactos ambientais (ENGLISH & NAVAID, 1996).

Segundo Geerts e Raes (2009), a irrigação deficitária é vantajosa em locais onde a água é fator limitante para a produção agrícola, podendo nestes casos o uso eficiente da água ser mais rentável para o produtor do que o aumento da produtividade.

Observa-se que os tipos de adubação apresentaram comportamento semelhante aos resultados das demais variáveis analisadas ao longo do experimento, de modo que a adubação composta com 100% com adubação orgânica com esterco bovino contribuiu significativamente a 5% pelo teste Tukey para elevar a produtividade da água de irrigação, em relação aos demais tratamentos, embora não tenha diferido da adubação organomineral (Figura 11).

De acordo com Santos (2016), o termo *WP* visa aumentar os rendimentos da cultura por unidade de água utilizada, podendo ser alcançada por meio de opções tecnológicas que levam a melhoria da produção agrícola, como manejo da água, da cultura e do solo através do seu estado nutricional; reduzindo as perdas hídricas por evaporação e percolação; contribuindo para uma maior retenção na zona radicular da planta.

Leu et al. (2010) simularam o conteúdo de matéria orgânica em três principais categorias de solos encontradas em Ouagadougou, localizada na região desértica de Burkina Faso na África Subsaariana e concluíram que a elevação no teor de matéria orgânica nos solos melhoraram propriedades como infiltração, capacidade de retenção de água, água disponível e condutividade hidráulica, podendo ser implementada como uma importante estratégia para melhorar a eficiência em programas de irrigação em regiões desérticas e semiáridas, reduzindo a lâmina de água a ser aplicada e aumentando o intervalo entre irrigações.

CONCLUSÃO

A utilização de lâminas de irrigação deficitárias (60% e 80% de reposição da ET_o) associada a adubação orgânica não prejudica o desenvolvimento da cultura do pimentão vermelho quando utilizada irrigação mais frequente e fracionada em dois intervalos de irrigações.

O acúmulo de massa seca nos frutos é incrementado com o aumento da água da lâmina de irrigação entre 60 e 120% de reposição da ET_o .

A massa fresca e seca dos frutos de pimentão vermelho 'Rubi Gigante' é incrementada com a presença de material orgânico na adubação.

A menor produtividade da água é obtida com a utilização da lâmina de água de irrigação de 120% de reposição da ET_o e seu uso não proporciona benefícios à produtividade por hectare da cultura.

O uso do esterco bovino na forma isolada ou como complemento com adubos minerais aumentou a produtividade de água, ou seja, a eficiência do uso da água pelas plantas do pimentão vermelho Rubi Gigante em ambiente protegido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. V; NETO, O. C. D. Estudo **comparativo de adubação orgânica e química no cultivo de Tomate Cereja**. Repositório Institucional-FUCAMP, Agronomia – Artigos. 2018
- ARAGÃO JÚNIOR, T. C.; MAGALHÃES, C. A.; SANTOS, C. S. V. **Efeitos de níveis de umidade no solo em cultivares de melão (*Cucumis melo*, L.)**. Fortaleza: EPACE, 1991. 16p. Boletim de Pesquisa, 19.
- BLAT, S.F.; BRAZ, L.T.; ARRUDA, A.S. Avaliação de híbridos duplos de pimentão. **Horticultura Brasileira**, v. 25, n. 3, p. 350-354, 2007.
- CAVALCANTI, F. S. A. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco. 2ª aproximação**. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco. 212 p. 2008.
- DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- DONATO, P. E. R. Morfometria e rendimento da palma forrageira ‘Gigante’ sob diferentes espaçamentos e doses de adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.1, p.151-158, 2014.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for prediction of crop water requirements**. 2.ed. 179p. FAO Irrigation and drainage Paper, 24. Rome, 1997.
- ENGLISH, M.; NAVAID, S. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdã. v.32, p.1-14, 1996.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis sistem. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, UFLA, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, Lavras-MG, 2011.
- FRANCISCO, P.R.M.; SANTOS, D. **Classificação Climática de Köppen e Thornthwaite para o Estado da Paraíba**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. CONTECC-2018, Maceió – Al, 2018.
- FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras, UFLA, 2001. 261 p.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v.96, p.1275-1284, 2009.
- HARGREAVES, G. H. **Precipitation Dependability and Potentials for Agricultural Production in Northeast Brazil**. Utah, StateUniversity, September, 1974. 64p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Sistema IBGE de Recuperação Automática – Sidra. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6619/>>. Acesso em: 12 de jan. 2018.
- LEU, J. M; TRAORE, S; WANG, Y. M; KAN, C.E. The effect of organic matter amendment on soil water holding capacity change for irrigation water saving: Case study in Sahelian environment of Africa. **Scientific Research and Essays**. v.5 n.23, p.3564-3571, 4 dec. 2010.

LIMA, P. A. de; MONTENEGRO, A. A. A; LIRA JR. M. A; SANTOS, F. X. dos; PEDROSA, E. M. R. Efeito do manejo da irrigação com água moderadamente salina na produção de pimentão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** v.1, n. único, p. 73-80, out-dez. 2006. Recife, PE, UFRPE.

F; NOGUEIRA, L. C; SOUSA, V. F de. MANEJO da água de irrigação. In: Sousa, V. F de; Marouelli, W. A; Coelho, E. F; PINTO, J. M; FILHO, M. A. C., (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. Cap. 5. p. 161.

PADRÓN R. A. R; RAMÍREZ L. R; SWAROWSKY A; DABOÍN JR. Effect of deficit irrigation and different frequencies in the production of bell pepper. **Interciência**, v.39, n.8, p.591-597, ago. 2014.

PADRÓN, R. A. R.; GUEDES, J. V. C.; SWAROWSKY.; NOGUEIRA, C. U.; CERQUERA, R. R.; DIAZ-PÉREZ, J. C. Supplemental irrigation levels in bell pepper under shade mesh and in open-field: Crop coeficiente, yield, fruit quality and water productivity. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, n.44, p.4117-4125, oct, 2015.

REBOUÇAS NETO, M. DE O.; AZEVEDO, B. M. de; ARAÚJO, T. V. V. de; VASCONCELOS, D. V. de; FERNANDES, C. N. V. Irrigation frequency on economic performance and productivity of tomato in the coast of Ceará, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.30, n.4, p.971-979, 2017. Recife, PE, UFRPE.

SANTOS, G. S. O.; **Utilização de resíduos vegetais e esterco bovino: uma alternativa para uma agricultura sustentável**. 2018. 32p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, RS, 2018.

SANTOS H, S. M. Basic Concepts of Water Productivity. In: A. K. Singh, Santosh S. M., Bikash D., Bhavana P., Kumar P.R., Sarkar B., Bhatt, B. P., (Ed.). **Approaches to Improve Agricultural Water Productivity**. Satish Serial Publishing House, p.1-13, 2016.

SILVA, M. S; **Efeitos de esterco bovino em atributos químicos e físicos do solo, produtividade de milho e créditos de nitrogênio**. 2018. 77p. Tese (doutorado em Agronomia-Ciência do solo) – Faculdade de Ciências agrárias e Veterinárias – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018.

SILVA, G. H.; FERREIRA, M. G.; PEREIRA, S. B.; DELAZARI, F. T.; SILVA, D. J. H. Response of bell pepper crop subjected to irrigation depths calculated by diferente methodologies. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande,v.22, n.1, p.45–50, 2018.

SOUZA, S. G. de. **Produtividade e qualidade de pimentão amarelo sob diferentes níveis de depleção de água no substrato**. 2017. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Petrolina, 2017.

ZAVATTARO, L.; BECHINI, L.; GRIGNANI, C.; EVERT, F. VAN; MALLAST, J.; SPIEGEL, H.; SANDÉN, T.; PECIO, A.; CERVERA, J. V. G.; GUZMÁN, G.; VANDERLINDEN, K.; D’HORSE, T.; RUYSSCHAERT, G.; HEIN, F. M. Agronomic effects of bovine manure: A review of long-term European field experiments. **European Journal of Agronomy**, v.90, p.127-138, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.010> [Links]

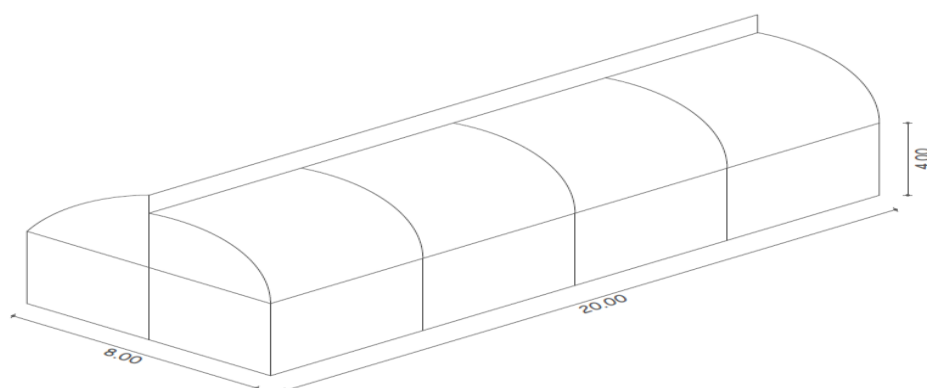


Figura 1. Ilustração da casa de vegetação utilizada para o experimento. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

Autor: Yuri Matos.

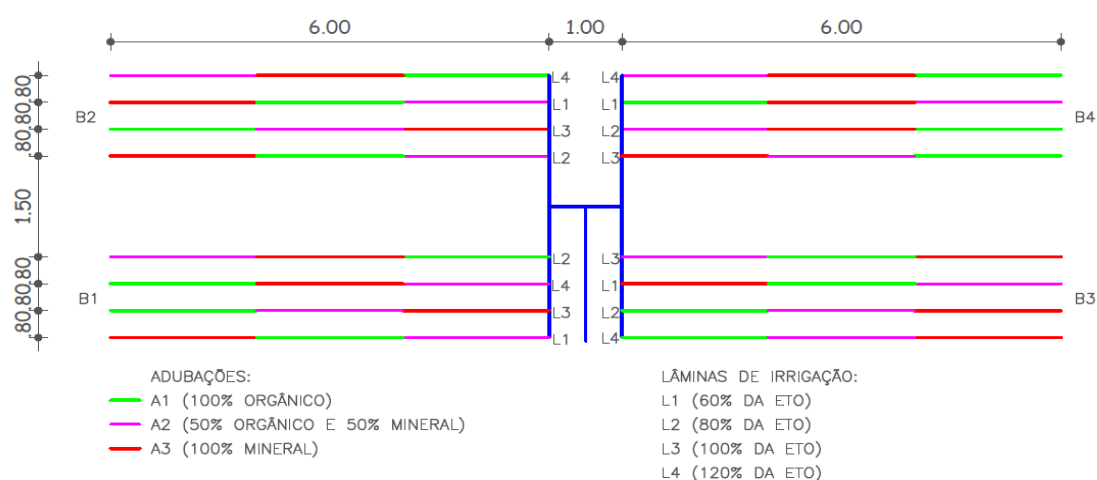


Figura 2. Croqui da área experimental. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

Autor: Yuri Matos.

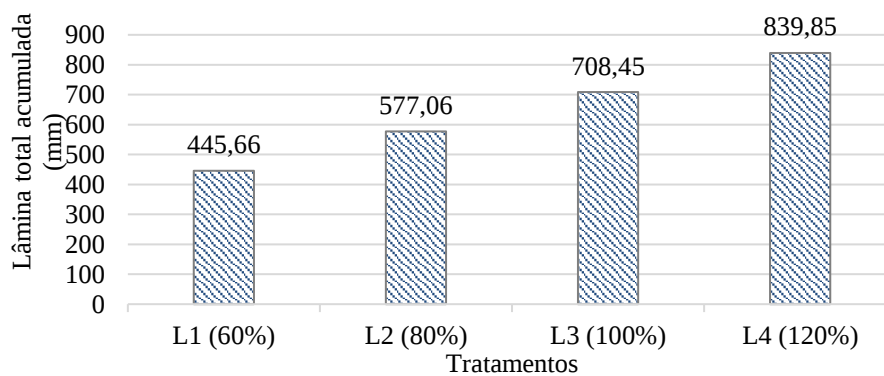


Figura 3. Lâminas aplicadas (mm) durante o experimento em função de cada tratamento. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

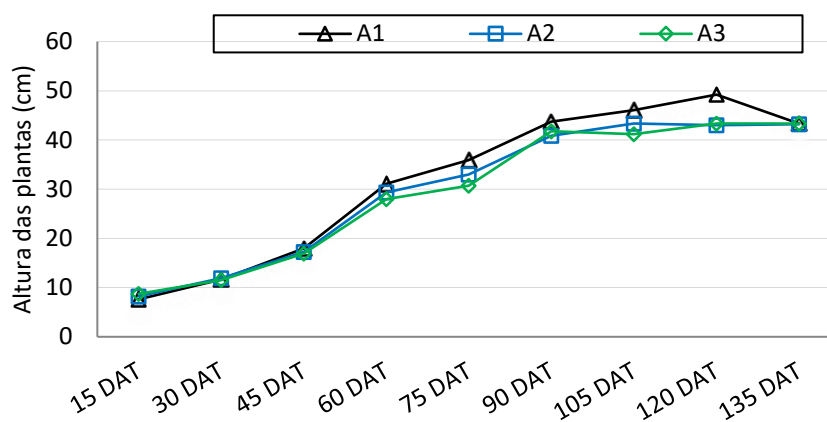


Figura 4. Altura de plantas de pimentão Rubi Gigante em função de tipos de adubação, aos 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 e 135 dias após o transplante. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

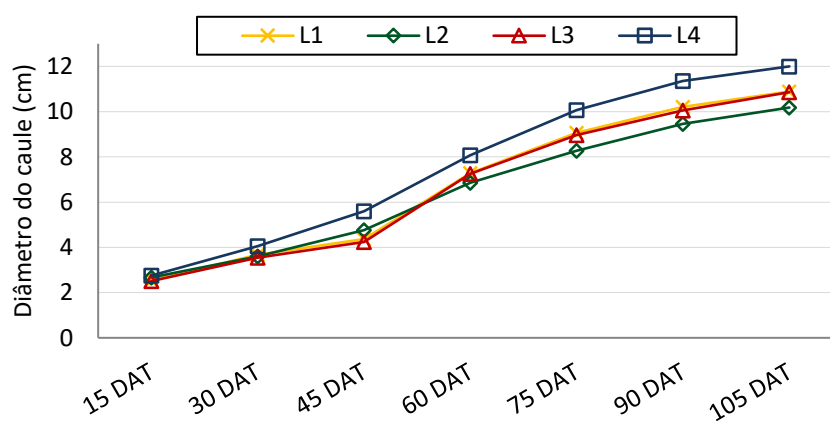


Figura 5. Diâmetro do caule de plantas (cm) de pimentão Rubi Gigante em função de diferentes lâminas de irrigação aos 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 dias após o transplante. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

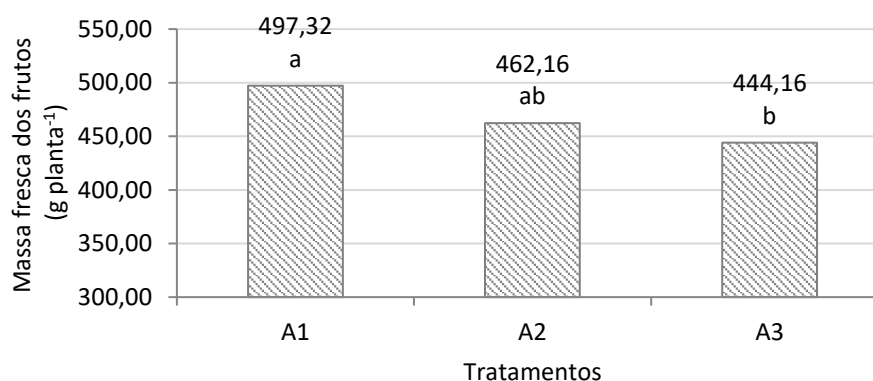


Figura 6. Massa fresca de frutos (g) de pimentão vermelho 'Rubi Gigante', após cinco colheitas, em função de diferentes tipos de adubações. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019. A1= 100% esterco bovino; A2= organomineral e A3= 100% mineral.

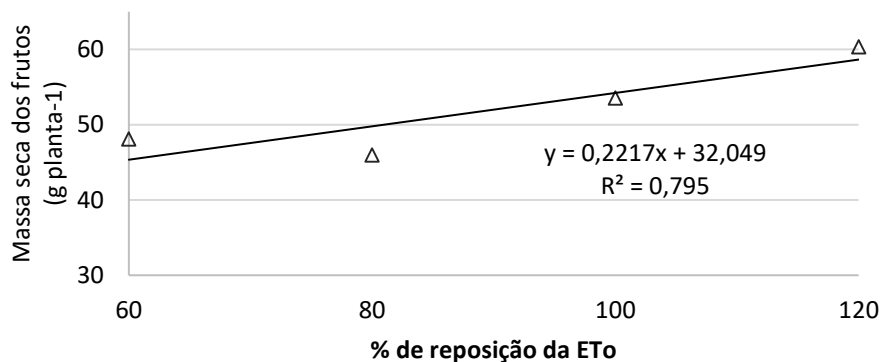


Figura 7. Massa seca dos frutos (g) de pimentão vermelho 'Rubi Gigante', em função de diferentes tipos de adubação após cinco colheitas. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019. L1= 60% ETo; L2= 80% ETo; L3= 100% ETo e L4=120% ETo

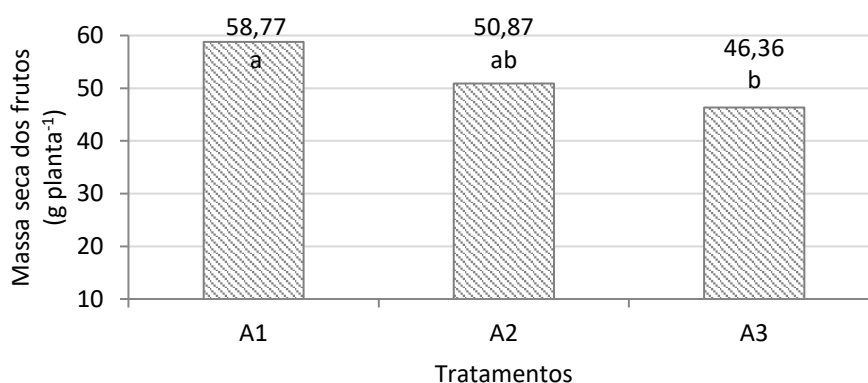


Figura 8. Massa seca dos frutos (g) de pimentão vermelho 'Rubi Gigante' em função de diferentes tipos de adubação após cinco colheitas. São Domingos-Pb, UFCG/CCTA. 2019. A1= 100% esterco bovino; A2= organomineral e A3= 100% mineral.

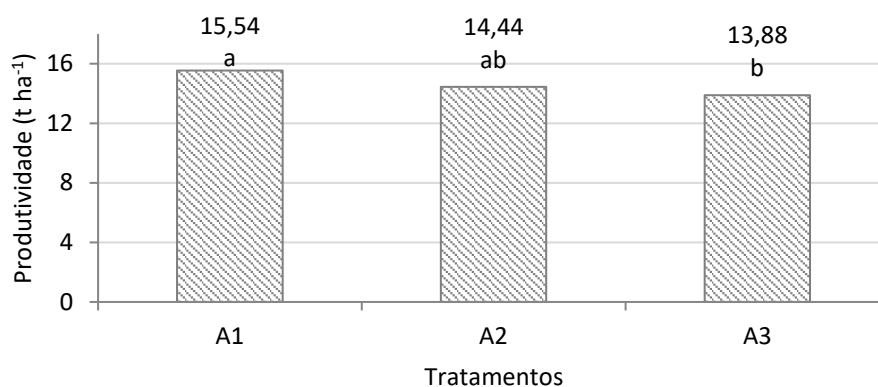


Figura 9. Produtividade (t ha⁻¹) de frutos de pimentão vermelho 'Rubi Gigante', após cinco colheitas, em função de diferentes tipos de adubação. São Domingos-Pb, UFCG/CCTA. 2019. A1= 100% esterco bovino; A2= organomineral e A3= 100% mineral.

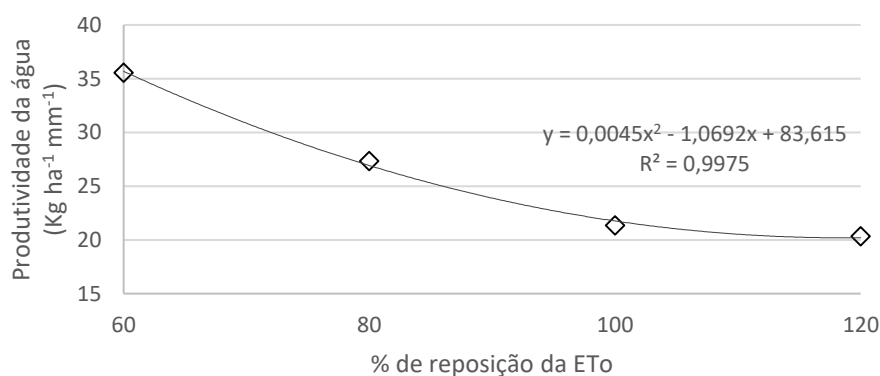


Figura 10. Produtividade da água (kg ha⁻¹ mm⁻¹) de pimentão vermelho 'Rubi Gigante', em função de diferentes lâminas de irrigação após cinco colheitas. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

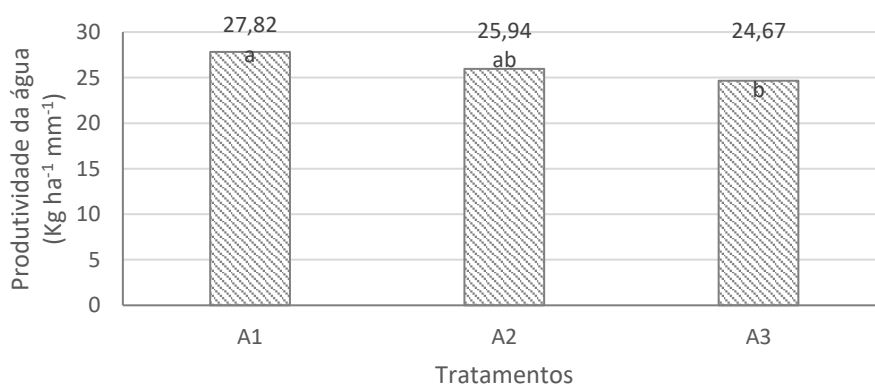


Figura 11. Produtividade da água (kg ha⁻¹ mm⁻¹) de pimentão vermelho Rubi Gigante, após cinco colheitas, em função de diferentes tipos de adubações. São Domingos-Pb, UFCG/CCTA. 2019. A1= 100% esterco bovino; A2= organomineral e A3= 100% mineral.

Tabela 1. Análises químicas do solo da área experimental. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

Variáveis	Valores obtidos
Potássio (meq 100g ⁻¹ de solo)	0,43
Sódio (meq 100g ⁻¹ de solo)	1,96
Cálcio (meq 100g ⁻¹ de solo)	3,16
Magnésio (meq 100g ⁻¹ de solo)	1,07
Alumínio (meq 100g ⁻¹ de solo)	0,00
Hidrogênio (meq 100g ⁻¹ de solo)	0,21
Fósforo assimilável (mg 100g ⁻¹)	10,32
Soma de Bases (cmol _c dm ⁻³)	6,62
CTC (cmol _c dm ⁻³)	6,83
Matéria Orgânica (%)	1,90
pH em água (1:2,5)	6,77
Saturação por Bases – V %	97,20

Tabela 2. Diâmetro do caule (mm) das plantas de pimentão ‘Rubi Gigante’ no desdobramento dos tipos de adubações dentro de lâminas e desdobramento de lâminas de água de irrigação dentro de adubação aos 15 e 30 dias após o transplantio. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

Lâminas	15 DAT			30 DAT		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
L1	2,46ABa	2,92Aa	2,24Bb	3,61ABa	4,22Aa	3,18Ba
L2	2,50Aa	2,72Aa	2,79Aab	3,12Aa	3,74Aa	3,94Aa
L3	2,38Aa	2,54Aa	2,62Aab	3,40Aa	3,57Aa	3,68Aa
L4	2,60Ba	2,51Ba	3,15Aa	3,98Aa	3,70Aa	4,49Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste Tukey a 5%. L1= 60% ETo; L2= 80% ETo; L3= 100% ETo e L4=120% ETo; A= Tipos de adubações; A1= 100% esterco bovino; A2= organomineral e A3= 100% mineral.

Tabela 3. Diâmetro do caule (cm) de plantas de pimentão Rubi Gigante, em função de diferentes lâminas de irrigação, aos 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 dias após o transplântio. São Domingos-PB, UFCG/CCTA. 2019.

TRAT	15 DAT	30 DAT	45 DAT	60 DAT	75 DAT	90 DAT	105 DAT
L1	2,54a	3,67a	4,36a	7,28a	9,07a	10,21ab	10,89ab
L2	2,67a	3,60a	4,76a	6,86a	8,27a	9,46b	10,18b
L3	2,51a	3,55a	4,24a	7,25a	8,97a	10,05ab	10,86ab
L4	2,75a	4,06a	5,60a	8,07a	10,07a	11,36a	12,00a
Média	2,62	3,72	4,74	7,37	9,10	10,27	10,99
CV (%)	19,01	28,65	31,42	21,12	17,34	14,24	9,34

Médias seguidas de mesma letra nas colunas, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. L= lâmina de água de irrigação; L1= 60% ETo; L2= 80% ETo; L3= 100% ETo e L4=120% ETo.

Capítulo 8



10.37423/230207193

IDENTIFICAÇÃO DE UM MODELO PARAMÉTRICO NÃO LINEAR PARA SINTONIA DO CONTROLADOR DE VELOCIDADE NA ESTRUTURA DE CONTROLE VETORIAL INDIRETO DE UM MIT

Renato Santana Ribeiro Junior

Universidade Federal de Campina Grande

Eubis Pereira Machado

*Universidade Federal do Vale do São
Francisco*

Manoel de Oliveira Santos Sobrinho

*Universidade Federal do Vale do São
Francisco*



Abstract: The controllers of the three-phase induction motor control structures present analytical tuning difficulties due to the non-linear characteristics of the system. The complex dynamics of drive systems require different simplifications for a linear representation. Such approximations can degrade the resulting linear model and limit the performance of the control system design. In this work, parametric identification is used to obtain a discrete, input-output nonlinear model, which characterizes the motor with indirect vector control, in a certain operating range. Based on the identified model, a discrete transfer function is Springer Nature 2021 LATEX template Controle para motor de indução trifásico obtained from the system, which will be used to design an integral proportional controller, which must perform the speed control of the motor, using the electromagnetic torque as the control variable.

Keywords: Induction machine; Indirect vector control; Identification; Proportional integral controller; Nonlinear model.

1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MIT) são amplamente utilizados em todas as áreas tecnológicas, pois apresentam baixo custo, robustez e boa eficiência. Aliado à confiabilidade dos atuais dispositivos eletrônicos digitais e de potência, o uso dos MIT operando em malha fechada tem aumentado em aplicações industriais. No entanto, por serem regidos por equações diferenciais ordinárias não lineares e acopladas, apresentam certas dificuldades para a sintonia de controladores presentes nas malhas de controle, tal como evidenciado em [1].

O comportamento dinâmico da MIT pode ser representado por um sistema de significativa complexidade em termos de modelagem e análise. Nessas máquinas, o fluxo de acoplamento magnético de um dado enrolamento é função da posição instantânea do rotor, das correntes que fluem pelo próprio enrolamento, bem como das correntes que fluem pelos demais enrolamentos do estator e do rotor. Devido à natureza variante no tempo dos coeficientes das equações diferenciais, geralmente se recorre a uma transformação de coordenadas, a fim de facilitar as análises e solução das equações. O detalhamento da modelagem da máquina para estudos de dinâmica, bem como o procedimento de solução numérica das equações podem ser consultados em [2] e [3].

Nos sistemas de acionamento de máquinas elétricas rotativas, existem diferentes propostas para o controlador de velocidade, a exemplo de controladores proporcional integral (PI) [4–6], controle por modo deslizante adaptativos [7], controle preditivo [8–10] e preditivo robusto [11, 12]. Embora os controladores baseados na teoria de controle moderno tenham sua eficácia comprovada, em sistemas de acionamentos tradicionais, geralmente se adota um PI para o controlador de velocidade [13]. Tais controladores apresentam estrutura simples, estabilidade e confiabilidade, o que têm propiciado sua disseminação e permanência no setor industrial.

O processo de sintonia de controladores de sistemas dinâmicos é facilitado quando se adota o domínio da frequência. Evidentemente, a relação entrada-saída do sistema deve ser conhecida, seja na forma de resposta em frequência ou na forma de uma função de transferência. Contudo, utilizando-se apenas da teoria de sistemas lineares, a relação entrada-saída é árdua de ser obtida devido as características intrínsecas do MIT, a exemplo das não linearidades, da natureza multivariável, bem como da presença de componentes essenciais ao sistema de acionamento, a exemplo do inversor de frequência e filtro de saída que, fisicamente, são elementos propiciadores de atrasos na planta. Segundo [14], a dinâmica complexa dos MIT e dos periféricos da malha de controle requerem

diferentes aproximações para uma representação linear, o que pode degradar o modelo resultante, tornando o desempenho do projeto de sistema de controle limitado á qualidade das aproximações.

Neste trabalho, utiliza-se identificação paramétrica para se obter um modelo não linear discreto, do tipo entrada-saída, para caracterizar todo o sistema composto pelo MIT com o controle vetorial indireto, numa determinada faixa de operação. A partir desse modelo, obtém-se uma função de transferência discreta do sistema, que será utilizada para se projetar um controlador proporcional integral, o qual deve efetuar o controle de velocidade do MIT, utilizando o torque eletromagnético como variável de controle.

2 PRINCÍPIOS DE CONTROLE DO MIT POR ORIENTAÇÃO DO CAMPO DO ROTOR

A partir do desenvolvimento dos modelos dinâmicos do MIT, adotando-se o referencial qd0 síncrono, as componentes do fluxo estatórico $(\lambda_{qs}^e, \lambda_{ds}^e)$ e do fluxo rotórico $(\lambda_{qr}^{e'}, \lambda_{dr}^{e'})$ estão relacionados com as componentes das correntes do estator (i_{qs}^e, i_{ds}^e) e do rotor $(i_{qr}^{e'}, i_{dr}^{e'})$ por:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs}^e \\ \lambda_{ds}^e \\ \lambda_{qr}^{e'} \\ \lambda_{dr}^{e'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r' & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{qr}^{e'} \\ i_{dr}^{e'} \end{bmatrix} . \quad (1)$$

Sendo,

- L_m a indutância de magnetização;
- L_s a autoindutância do estador;
- L_r' autoindutância do rotor.

A partir de (1), Note que se existe orientação por fluxo do rotor, não há componente do fluxo rotórico na direção do eixo q^e rotativo, isto é, $\lambda_{qr}^{e'} = 0$. Assim,

$$\lambda_{qr}^{e'} = L_m i_{qs}^e + L_r' i_{qr}^{e'} = 0 \Rightarrow i_{qr}^{e'} = -\frac{L_m}{L_r'} i_{qs}^e . \quad (2)$$

Por conveniência, expressando o torque eletromagnético em termos dos fluxos e correntes do rotor, tem-se:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{dr}^{e'} \lambda_{qr}^{e'} - i_{qr}^{e'} \lambda_{dr}^{e'}) . \quad (3)$$

Em condições de orientação do fluxo rotórico $\lambda_{qr}^{e'} = 0$, permitindo expressar:

$$T_e = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{dr}^{e'} i_{qr}^{e'} . \quad (4)$$

Substituindo (2) em (4),

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r'} \lambda_{dr}^{e'} i_{qs}^e . \quad (5)$$

Portanto, em condições de orientação do fluxo do rotor, se o fluxo for mantido constante, então o torque eletromagnético é proporcional à componente em quadratura da corrente gestatória, que é um resultado análogo ao obtido para uma Máquina CC de excitação independente: torque eletromagnético proporcional à corrente de armadura.

A fim de investigar como o fluxo resultante do rotor pode ser controlado, a partir de (1) pode-se escrever:

$$\lambda_{dr}^{e'} = L_m i_{ds}^e + L_r' i_{dr}^{e'} , \quad (6)$$

indicando que a regulação de $\lambda_{dr}^{e'}$ pode ser obtida pelo controle das componentes i_{ds}^e e $i_{dr}^{e'}$. Por outro lado, no MIT de excitação única, a corrente $i_{dr}^{e'}$ não pode ser regulada por uma ação de controle, indicando que a formulação apresentada em (6) deve ser alterada.

A partir de (6), expressando $i_{dr}^{e'}$:

$$i_{dr}^{e'} = \frac{\lambda_{dr}^{e'} - L_m i_{ds}^e}{L_r'} . \quad (7)$$

Substituindo (7) na equação que governa a componente do eixo direto da tensão do rotor representada no referencial síncrono, isto é,

$$v_{dr}^{e'} = r_r' i_{dr}^{e'} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^{e'} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^{e'} , \quad (8)$$

obtém-se:

$$v_{dr}^{e'} = \frac{r_r'}{L_r'} (\lambda_{dr}^{e'} - L_m i_{ds}^e) - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^{e'} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^{e'} . \quad (9)$$

Assumindo o MIT de excitação única, nas condições de orientação de campo a Equação (9) torna-se:

$$0 = \frac{r_r'}{L_r'} (\lambda_{dr}^{e'} - L_m i_{ds}^e) - 0 + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^{e'} , \quad (10)$$

ou, de outra forma,

$$\lambda_{dr}^{e'} = \frac{r_r' L_m}{r_r' + L_r' \frac{d}{dt}} i_{ds}^e . \quad (11)$$

Portanto, na condição de orientação de campo, o fluxo do rotor passa a ser controlado pela componente de eixo direto das correntes gestatórias, o que é factível para sistemas de acionamento com uma malha fechada de corrente.

Note que (11) foi obtida a partir da aplicação de condições de contorno sob o modelo matemático do MIT no referencial síncrono, a saber:

- Os eixos $q^e d^e$ giram à velocidade síncrona;
- O eixo d^e deve estar alinhado/orientado com o vetor do fluxo resultante do rotor.

Assim, o mapeamento da posição angular (espacial ou instantânea) do fluxo rotórico é vital para a correta orientação de campo.

2.1 CONTROLE POR ORIENTAÇÃO INDIRETA DO CAMPO DO ROTOR

Os métodos de controle vetorial indireto caracterizam-se pelo uso do modelo matemático da máquina para estimar a posição angular instantânea do campo do rotor referenciado ao estator, $\vec{\lambda}_r'$. Uma vez que este fluxo rotaciona à velocidade síncrona para um referencial fixo no estator, uma estimativa para a posição angular instantânea de $\vec{\lambda}_r'$ é:

$$\begin{aligned} \theta_s(t) &= \int (\omega_r + \omega_{sl_e}) dt \\ &= \int \omega_e dt . \end{aligned} \quad (12)$$

Logo, se o enrolamento estatórico fosse alimentado por uma fonte de excitação com frequência invariante no tempo, $\theta_s(t)$ poderia ser obtido diretamente pela Integração da frequência elétrica, fornecendo $\omega_e t + \theta_0$, sendo θ_0 a posição inicial do fluxo do rotor em relação a um referencial fixo no estator.

A frequência de excitação do estator trata-se de uma variável regulada em função do ponto de operação da velocidade do rotor e do nível de fluxo desejado para a máquina. Nesse sentido, a posição angular de $\vec{\lambda}_r'$ geralmente é estimada pela superposição de duas componentes, a saber:

$$\begin{aligned}\theta_s(t) &= \int \omega_r dt + \int \omega_{sle} dt \\ &= (\omega_r t + \theta_{r0}) + (\omega_{sle} t + \theta_{sle0}) \\ &= (\theta_r(t) + \theta_{r0}) + (\theta_{sle}(t) + \theta_{sle0}) ,\end{aligned}\tag{13}$$

sendo:

- $\theta_r(t)$ a posição do rotor em relação a um referencial fixo no estator;
- $\theta_{sle}(t)$ posição do fluxo rotórico em relação à estrutura física girante do rotor.

Na forma apresentada, $\theta_s(t)$ depende das condições iniciais θ_{r0} e θ_{sle0} .

Contudo, com o processo de revolução do rotor o erro introduzido pela omissão dessas constantes tende a zero, de modo que:

$$\theta_s(t) = \theta_r(t) + \theta_{sle}(t) .\tag{14}$$

O valor de $\theta_r(t)$ geralmente é medido por meio de um sensor de posição instalado no eixo do rotor do MIT. Por outro lado, a forma de mensurar a velocidade de escorregamento e, portanto, $\theta_{sle}(t)$ é o que caracteriza o controle vetorial indireto.

Para eixos qd no referencial síncrono, a componente do eixo em quadratura da tensão rotórica pode ser expressa por:

$$v_{qr}^{e'} = r_r' i_{qr}^{e'} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^{e'} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^{e'} .\tag{15}$$

Como, $v_{qr}^{e'} = 0$ e, a priori $\lambda_{qr}^{e'} = 0$, pois se assume a premissa da orientação de campo, a velocidade de escorregamento pode ser computada por:

$$\begin{aligned}\omega_{sle} &= (\omega_e - \omega_r) \\ &= -\frac{1}{\lambda_{dr}^{e'}} r_r' i_{qr}^{e'}.\end{aligned}\quad (16)$$

As grandezas $\lambda_{dr}^{e'}$ e $i_{qr}^{e'}$ não são medidas diretamente, requerendo outra formulação para o cômputo de ω_{sle} . Como no caso de $\lambda_{dr}^{e'}$ apresentado em (6), é conveniente é escrever o escorregamento em função das correntes do estator da máquina, pois não requerem condições especiais para medição.

Nas condições de orientação de campo do rotor, verificou-se por meio das Equações (2) e (11), respectivamente, que:

$$i_{qr}^{e'} = -\frac{L_m}{L_r'} i_{qs}^e \quad (17)$$

$$\lambda_{dr}^{e'} = \frac{r_r' L_m}{r_r' + L_r' \frac{d}{dt}} i_{ds}^e. \quad (18)$$

Substituindo (17) e (18) em (16), tem-se:

$$\begin{aligned}\omega_{sle} &= \left(\frac{r_r' + L_r' \frac{d}{dt}}{r_r' L_m i_{ds}^e} \right) \frac{r_r' L_m}{L_r'} i_{qs}^e \\ &= \left(\frac{r_r'}{L_r'} + \frac{d}{dt} \right) \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e}.\end{aligned}\quad (19)$$

Portanto, a estimação da velocidade de escorregamento pode ser computada a partir de informações das correntes do estator, bem como da constante de tempo do rotor, $\tau_r = \frac{L_r'}{r_r'}$. Observa-se que o controle vetorial indireto é dependente dos parâmetros da máquina, podendo apresentar perda de desempenho quando há variações nos parâmetros da máquina, sobretudo na constante de tempo do rotor que é a principal causa da desorientação de campo. A fim de melhorar a robustez do sistema de controle, na literatura apresentam-se diferentes propostas de correção da constante de tempo do rotor, a exemplo de [15].

3 OBTENÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO

O controlador a ser implementado neste trabalho é baseado em uma função de transferência discreta, a qual será obtida a partir de um modelo paramétrico identificado do sistema simulado em *software*,

que é o sistema representado na Figura 1. O modelo é do tipo entrada-saída, sendo que a entrada, a variável

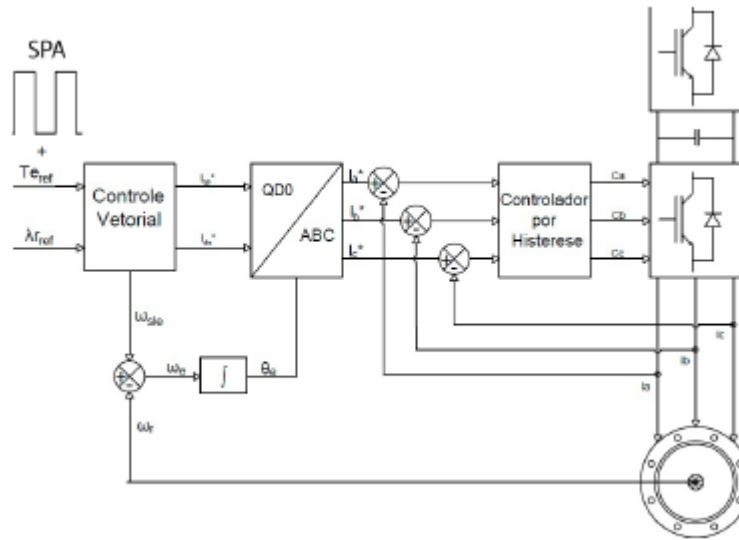


Fig. 1 Sistema em malha aberta a ser identificado.

manipulada, é o torque eletromagnético T_{ref} e a saída, a variável a ser controlada, é a velocidade angular do motor, ω_r , com o fluxo λ_{ref} permanecendo constante. Devida às não linearidades, optou-se pela identificação de um modelo polinomial NARMAX (*Nonlinear Autoregressive Moving Average Model with Exogenous Signals*), que é linear nos parâmetros, o que permite o uso de todas as técnicas de identificação de sistemas lineares, o que se constitui uma importante vantagem deste tipo de modelo [16].

Após a escolha do modelo, faz-se necessário estimar os parâmetros da equação. As ferramentas matemáticas clássicas utilizadas para esses fins são os denominados estimadores de parâmetros, sendo o estimador dos mínimos quadrados (MQ) e suas variantes os mais conhecidos e utilizados na engenharia [17]. Este algoritmo utiliza um conjunto de dados de entrada e saída do sistema. A identificação do sistema é realizada a partir de uma entrada de excitação que proporcione obter parâmetros consistentes com os parâmetros reais do sistema. Para que se consiga uma boa estimação de parâmetros, é necessário excitar o sistema de forma que o sinal de saída contenha suas principais características dinâmicas em diversas frequências e desta forma se consiga uma boa modelagem do processo. Para isso, utiliza-se na entrada um sinal de amplitude variada e tempo de duração de cada pulso variando em intervalos bem definidos. Este sinal é denominado de sinal pseudo-aleatório (SPA), o qual é aplicado na planta somado ao sinal de entrada, em um determinado ponto de operação [18].

A amplitude desse sinal varia aleatoriamente dentro de uma faixa de interesse e a largura dos pulsos podem variar de 4 a 10 vezes do período de amostragem, t_a . Este por sua vez é obtido a partir do tempo de resposta do sistema, t_r . Esse tempo de resposta é obtido colocando-se o sistema no ponto de operação escolhido e aplicado-se um pequeno degrau, de modo que a saída possa variar cerca de 10% do ponto de operação. Avalia-se o tempo de resposta do sistema quando sua saída entrar e permanecer na faixa de variação de 2%. O tempo de amostragem é calculado tomando-se cerca de 1/30 do tempo de resposta. O estágio inicial para modelagem foi a escolha do ponto de operação que se desejava identificar o sistema. Esse ponto foi escolhido de forma que o motor tivesse a uma velocidade de 75% da velocidade nominal do motor, ou seja, 141,37 rad/s, cujo torque eletromagnético é de 114,1 N·m, para uma carga de 100 N·m e um coeficiente de atrito dinâmico de 0,1 N·m/(rad/s). Com isso, o tempo de amostragem calculado foi $t_a = 0,001$ s.

O SPA assim obtido e que foi aplicado ao sistema é exibido na Figura 2. Aplicando-se o SPA na entrada do sistema obteve-se o conjunto de dados de saída. Esses dois conjuntos de dados são utilizados no estimador MQ para se obterem os parâmetros do modelo. A escolha da estrutura do modelo é um dos ingredientes básicos na formulação do problema de identificação [19]. Para o sistema proposto, foram testados diversos modelos, chegando-se ao modelo polinomial NARMAX representado por (20).

$$y[n] = 0,9987357y[n-1] - 1,4018 \times 10^{-6}(y[n-2])^2 + 1,2781 \times 10^{-5}u[n-1]y[n-1]. \quad (20)$$

sendo:

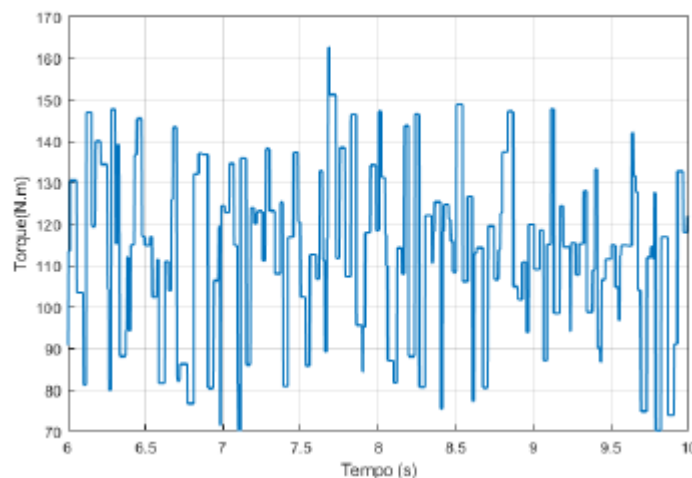


Fig. 2 Sinal pseudoaleatório.

- n - instante atual;
- $u[n]$ - a entrada do modelo no instante n ;
- $y[n]$ - saída do modelo no instante n .

Para se validar o modelo, deve-se comparar os dados de saída obtidos do sistema mostrado na Figura 1, com os dados de saída obtidos com a utilização do modelo proposto. Com isso, verificam-se as discrepâncias entre esses dois conjuntos de dados. Se não existirem discrepâncias significativas entre esses dados, é porque o modelo é válido e está conseguindo reproduzir de forma satisfatória as principais dinâmicas do sistema. Um critério que pode ser utilizado para se quantificar essas discrepâncias, é o do erro médio quadrático normalizado, dado por:

$$\varepsilon_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2}}, \quad (21)$$

sendo:

y_i - representa os dados experimentais;

$\bar{y}_i$ - representa os dados do modelo;

N - representa o número de dados.

Para que este método seja válido, é necessário utilizar, na validação, dados diferentes daqueles utilizados na estimação dos parâmetros. Desta forma, avalia-se a capacidade de generalização do modelo, observando sua funcionalidade com outro conjunto de dados obtidos do mesmo sistema [20]. As respostas do sistema e do modelo são mostradas na Figura 3. O erro médio quadrático normalizado para essa entrada foi de 0,34%.

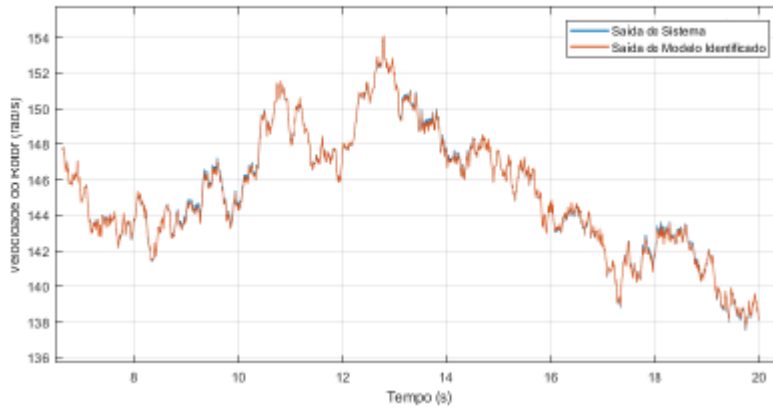


Fig. 3 Comparação entre as respostas do sistema em malha aberta e do modelo não linear identificado.

O controlador clássico que será projetado, utiliza o modelo discreto linear do sistema. Esse modelo pode ser obtido a partir da linearização do modelo NARMAX identificado do sistema. Esse modelo será linearizado no ponto de operação $\bar{u}$ e $\bar{y}$ obtido a partir da aproximação de Taylor de primeira ordem:

$$Y[n] = \frac{\partial(y[n])}{\partial(y[n-1])} Y[n-1] + \frac{\partial(y[n])}{\partial(y[n-2])} Y[n-2] + \frac{\partial(y[n])}{\partial(u[n-1])} U[n-1], \quad (22)$$

sendo:

- $Y[n] = y[n] - \bar{y}$;
- $Y[n-1] = y[n-1] - \bar{y}$;
- $Y[n-2] = y[n-2] - \bar{y}$;
- $U[n-1] = u[n-1] - \bar{u}$.

Assim, o modelo linear obtido foi o seguinte:

$$Y[n] = 1,00019445Y[n-1] - 3,96364 \times 10^{-4}Y[n-2] + 1,80684 \times 10^{-3}U[n-1]. \quad (23)$$

A resposta do modelo linear comparada á resposta do sistema é mostrada na Figura 4. O erro médio quadrático normalizado foi de 0, 57%. Isto mostra que o modelo linearizado pode representar satisfatoriamente o sistema.

4 PROJETO DO CONTROLADOR

O controlador que será projetado é um controlador clássico do tipo PI discreto no tempo. Inicialmente, obtém-se a função de transferência discreta, a qual

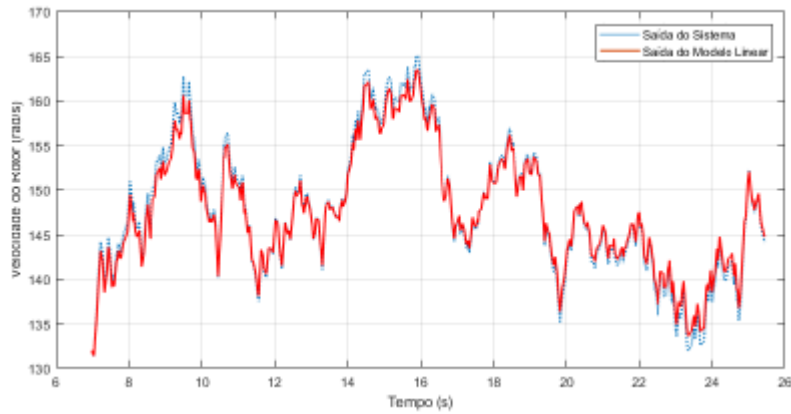


Fig. 4 Comparação entre as respostas do sistema em malha aberta e do modelo linear.

Pode ser obtida a partir do modelo linear representado por (23), a saber:

$$G[z] = \frac{1,80684 \times 10^{-3}}{z^2 - 1,00019445z + 3,96364 \times 10^{-4}} \quad (24)$$

ou, de modo equivalente,

$$G[z] = \frac{1,80684 \times 10^{-3}}{(z - 0,999798)(z - 3,96444 \times 10^{-4})} \quad (25)$$

A função de transferência do controlador PI discreto tem a seguinte forma:

$$G_{pi}(z) = K_c \frac{z - a}{z - 1} \quad (26)$$

Admitindo-se um sobressinal menor que 5% e um tempo de estabelecimento de até 0,5s, utilizou-se o método do Lugar das Raízes, para sintonizar o referido controlador, resultando em:

$$G_{pi}(z) = 40 \frac{(z - 0,99975)}{z - 1} \quad (27)$$

5 RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 5 apresenta a estrutura de controle vetorial indireto, em malha fechada, utilizada nas simulações. Os principais elementos do sistema são o controlador PI, algoritmo de orientação de

campo do rotor, inversor de frequência regulado por corrente e o motor de indução trifásico. O motor utilizado nas simulações apresenta as seguintes características: quatro polos, 40hp, 1800rpm, 480V e 60Hz. Os dados de ensaios da máquina são [21]:

- Ensaio CC: $V_{cc} = 12,0V$ e $I_{cc} = 59,0A$;
- Ensaio a vazio na frequência e tensão nominais: $I_L = 32,7A$ e $P_{vz} = 4664,4W$;

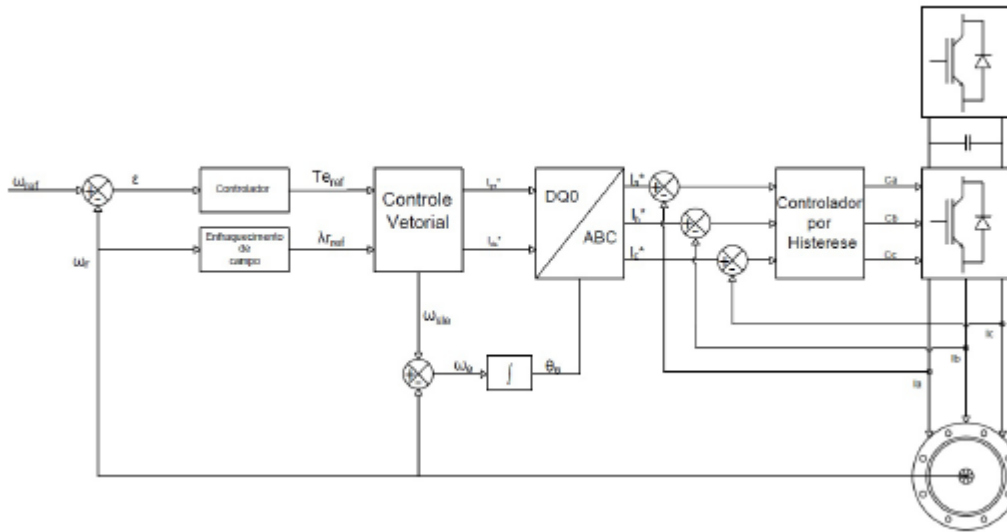


Fig. 5 Sistema de controle vetorial indireto, por orientação de fluxo do rotor, para análise de desempenho da metodologia proposta.

- Ensaio rotor bloqueado em 15Hz: $V_L = 36,2V$, $I_L = 58,0A$ e $P_{bl} = 2573,4W$..

A partir das informações dos ensaios, as resistências, indutâncias de dispersão e de magnetização da máquina obtidas foram $r_s = 0,1017\Omega$; $r'_r = 0,1533\Omega$; $X_{ls} = 0,6111\Omega$; $X'_{lr} = 0,4074\Omega$ e $X_m = 7,8638\Omega$.

Assumiu-se que o motor apresenta um momento de inércia de $J = 1,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e um coeficiente de atrito dinâmico de $B = 0,1 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad/s})$.

O sistema não teve *overshoot* na resposta ao degrau como mostra a Figura6, chegando ao valor de referência em 0,2s. Visto que o modelo foi obtido em condição de orientação de fluxo e na partida o sistema não está devidamente morientado pois o barramento CC do inversor limita a tensão, houve uma oscilação considerável.

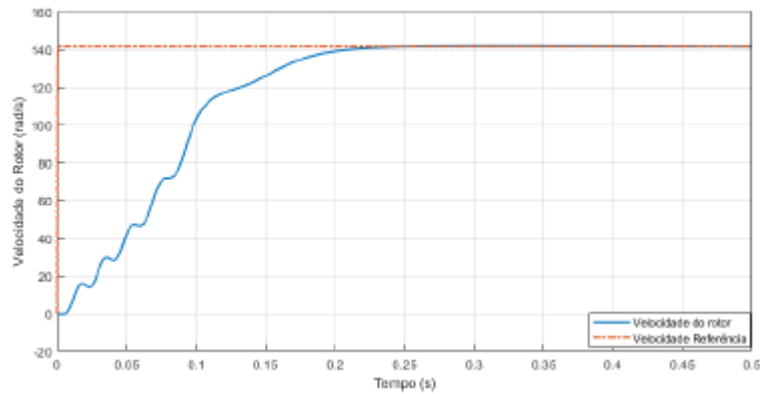


Fig. 6 Resposta do sistema em malha fechada para uma velocidade de referência em degrau.

Gerou-se um sinal arbitrário em rampa, com variação positiva e negativa para verificar o erro estacionário. A velocidade de referência aumentou em rampa com uma inclinação pré-definida, até atingir a velocidade nominal, depois reverteu a velocidade de referência como mostra a Figura 7. O fluxo Fig. 7

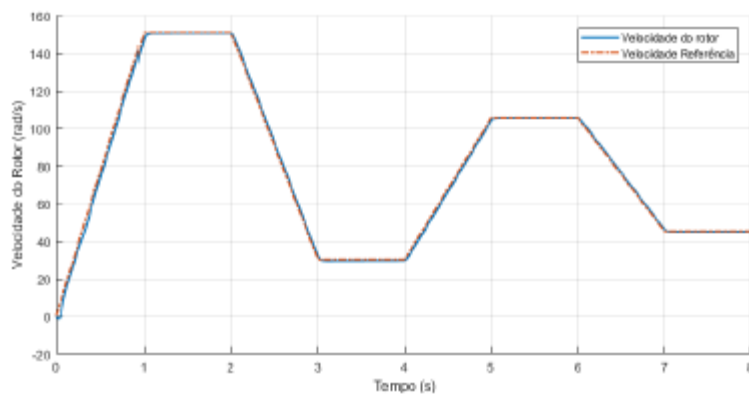


Fig. 7 Resposta do sistema em malha fechada para uma velocidade de referência arbitrária.

Resposta do sistema em malha fechada para uma velocidade de referência arbitrária. em coordenadas $qd0$ mostra que o sistema permaneceu em orientação mesmo com as variações da velocidade, como mostra a Figura 8.

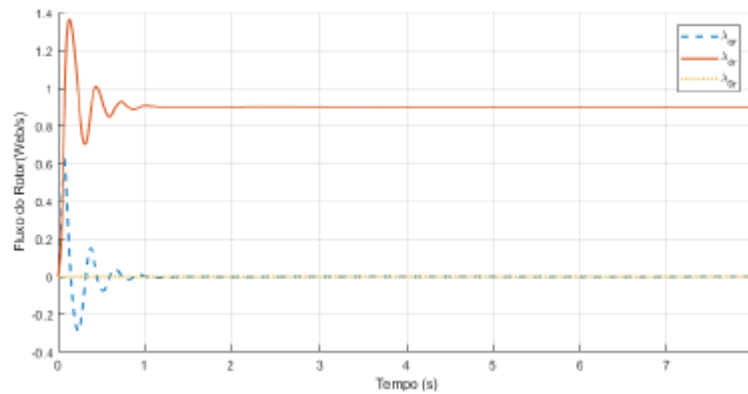


Fig. 8 Resposta do fluxo do rotor para a velocidade de referência indicada na Figura 7.

6 CONCLUSÃO

A obtenção de um modelo paramétrico não linear para caracterizar o sistema composto pelo MIT e os elementos do seu controle vetorial indireto, permitiu uma melhor caracterização do referido sistema. Esse modelo permitiu uma sintonia adequada de um controlador proporcional integral, cujos resultados mostraram-se satisfatórios no controle de velocidade do MIT a partir da manipulação do torque eletromagnético. Para trabalhos futuros, pode-se propor a implementa

REFERENCES

- [1] Chang, G.-W., Espinosa-Perez, G., Mendes, E., Ortega, R.: Tuning rules for the pi gains of field-oriented controllers of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 47(3), 592–602 (2000)
- [2] Wang, L., Jatskevich, J., Wang, C., Li, P.: A voltage-behind-reactance induction machine model for the emtp-type solution. *IEEE Transactions on Power Systems* 23(3), 1226–1238 (2008)
- [3] Machado, E.P., Pinto, A.C., Palomino, E.G.C.: Modelagem e simulação de máquinas de indução trifásicas sob alimentação não ideal. *X Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica* (2013)
- [4] Amezcua-Brooks, L., Liceaga-Castro, J., Liceaga-Castro, E.: Speed and position controllers using indirect field-oriented control: A classical control approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61(4), 1928–1943 (2014)
- [5] Jain, J.K., Ghosh, S., Maity, S., Dworak, P.: Pi controller design for indirect vector controlled induction motor: A decoupling approach. *ISA Transactions* 70, 378–388 (2017)
- [6] Jain, J.K., Ghosh, S., Maity, S.: Concurrent pi controller design for indirect vector controlled induction motor. *Asian Journal of Control* 22(1), 130–142 (2020)
- [7] Zeb, K., Ayesha, Haider, A., Uddin, W., Qureshi, M.B., Mehmood, C.A., Jazlan, A., Sreeram, V.: Indirect vector control of induction motor using adaptive sliding mode controller. In: *Australian Control Conference*, pp. 358–363 (2016)
- [8] Sobrinho, M.O.S., Machado, E.P., Bernardes, D.J.P.: Simulação em software de um motor de indução trifásico para controle de velocidade e implementação de dois controladores lineares. *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*, 1794–1799 (2015)
- [9] Meng, Q., Li, J., Li, H., Yan, Y.: Model predictive control of induction motors based on improved discretizing method under low switching frequency. In: *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 5144–5149 (2017)
- [10] Yan, L., Wang, F., Dou, M., Zhang, Z., Kennel, R., Rodríguez, J.: Active disturbance-rejection-based speed control in model predictive control for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67(4), 2574–2584 (2020)
- [11] Wang, B., Chen, X., Yu, Y., Wang, G., Xu, D.: Robust predictive current control with online disturbance estimation for induction machine drives. *IEEE Transactions on Power Electronics* 32(6), 4663–4674 (2017)
- [12] Yin, Z., Han, X., Du, C., Liu, J., Zhong, Y.: Research on model predictive current control for induction machine based on immune-optimized disturbance observer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 6(4), 1699–1710 (2018)
- [13] Krishnan, R.: *Electric Motor Drives - Modeling, Analysis, and Control*. Prentice Hall, Virginia Tech, Blacksburg, USA (2007)

- [14] Khadraoui, S., Fnaiech, M.A., Nounou, H.N., Nounou, M.N., Guzinski, J., Abu-Rub, H., Datta, A., Bhattacharyya, S.P.: Measurement-based control approach for tuning pid controllers: application to induction machines. *Journal of Control and Decision* 3(3), 179–196 (2016). <https://doi.org/10.1080/23307706.2016.1153436>
- [15] Vukosavic, S.N., Stojic, M.R.: On-line tuning of the rotor time constant for vector-controlled induction motor in position control applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 40(1), 130–138 (1993)
- [16] Aguirre, L.A.: *Introdução À Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Belo Horizonte-MG (2004)
- [17] °Astróm, K.J., Wittenmark, B.: *Adaptive Control*. Addison-Wesley series in electrical engineering : control engineering. Addison-Wesley, ??? (1995)
- [18] Sobrinho, M.O.S., Lima, J.S., Fontes, A.B., Almeida, L.A.L.: Caracterização de um módulo termoelétrico por multi-modelo paramétrico bilinear. XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora – MG (2008)
- [19] Yaacob, S., Mohamed, F.A.: Black-box modelling of the induction motor. In: *Proceedings of the 37th SICE Annual Conference. International Session Papers*, pp. 883–886 (1998)
- [20] Norton, J.P.: *An Introduction to Identification*, Ed. 2009. Academic Press, Orlando, Florida. (1986)
- [21] Chapman, S.J..e.: *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill Education, ??? (2011)

Capítulo 9



10.37423/230207194

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA RODOVIA BRASILEIRA 242/MT, POR MEIO DE ÍNDICES QUALITATIVOS

Gersina Nobre da Rocha Carmo Junior

Universidade Federal de Mato Grosso

Julyane Cruz Souza

Universidade Federal de Mato Grosso



1. INTRODUÇÃO

A construção de empreendimentos rodoviários é de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico e na qualidade de vida da população, uma vez que agiliza o transporte de mercadorias, aumento na geração de renda e novas oportunidades de emprego. No entanto, a construção de rodovias, constitui uma categoria de obras de grande porte, que podem causar impactos negativos ao meio ambiente, sobretudo na região em seu entorno (MAGALHÃES et al., 2011).

Diante disso, os danos gerados aos recursos hídricos, sobretudo quanto a construção de pontes de concreto, configura-se como um dos principais impactos ambientais negativos possíveis para este tipo de obra. Sendo assim, as possíveis alterações na qualidade da água podem estar relacionadas a movimentação do solo durante os serviços de formação de taludes, aterro e terraplanagem, pois podem gerar instabilidade nas encostas e erosões, assim propiciar o carreamento de solo aos corpos hídricos e consequentemente elevar a concentração de turbidez e sólidos neste (SANTINI, 2017).

Além disso, Santini (2017) acrescenta que nessas atividades podem haver possíveis despejos de efluentes sanitários e produtos químicos, como combustível, óleos e graxas, podendo atingir drenagens naturais na região do empreendimento. Por isso, se faz necessário um acompanhamento avaliativo nos corpos hídricos no período de construção, de modo a embasar ações de prevenção, proteção e recuperação ambiental, com o propósito de garantir os usos múltiplos atuais e futuros dos recursos hídricos (WEINBERG, 2013).

Desse modo, para o monitoramento de águas superficiais deve-se levar em consideração os usos previstos na Resolução CONAMA N° 357/05, assim como a seleção dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos e suas respectivas concentrações. Assim, com a intensão de transformar as informações oriundas do monitoramento em uma forma mais acessível e de fácil entendimento quanto a qualidade das águas superficiais e o seu estado de eutrofização aplica-se o Índice de Qualidade de Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET), respectivamente (COIMBRA, 2011). Portanto, o objetivo deste trabalho foi identificar e avaliar possíveis alterações nas águas superficiais no período de construção da BR-242, com embasamento na Resolução CONAMA N° 357/05 e nos Índices de Qualidade das Águas (IQA) e Estado Trófico (IET).

2. IMPACTOS AMBIENTAIS EM OBRAS RODOVIÁRIAS

Os impactos ambientais por eventos construtivos podem ser causados por vazamento de produtos químicos, despejo de matérias e substâncias tóxicas, modificação da topografia, devido as obras de escavação e aterros e montagem das estruturas de pontes, alterando o habitat dos animais e na fisiologia dos vegetais. Além disso, no

período de implantação e operação dessas construções geram ruídos, emissão de gases poluentes na atmosfera (MENDES et al., 2010).

Conforme o Manual de Implantação Básico de Rodovia do DNIT (Brasil, 2010) impacto ambiental é qualquer alteração significativa provocada pela ação humana nos componentes do meio ambiente, podendo ser positivos e negativos. Diante disso, a degradação da qualidade dos corpos hídricos pode estar relacionada com diferentes formas, como uso e ocupação do solo desordenado, falta de saneamento básico, ou seja, sofrem ação direta das atividades desenvolvidas no entorno da bacia hidrográfica (JUNIOR et al., 2013).

Sendo assim, a introdução de uma ponte, em um ambiente nativo pode modificar a ocorrência natural dos mecanismos associados à mudança do fluxo d'água, sobretudo, quando há casos de assoreamento do corpo d'água. Ademais, agentes agressivos atuantes nas estruturas resultam de ações ambientais ou atmosféricas, agressões biológicas ou por agressões oriundas de vícios construtivos ou da má utilização (ROHAN et al., 2016).

Os ecossistemas aquáticos são bastante sensíveis a estímulos externos e são os primeiros a responder a degradação ambiental e a poluição. A avaliação de impactos ambientais em ecossistemas aquáticos tem sido realizada através da medição de alterações nas concentrações de variáveis físicas e químicas. Este sistema de monitoramento, juntamente com a avaliação de variáveis microbiológicas (coliformes totais e fecais), constitui-se como ferramenta fundamental na classificação e enquadramento de rios e córregos em classes de qualidade de água (GOULART et al., 2003).

3. MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A avaliação de impactos ambientais em ecossistemas aquáticos é realizada por meio de medições de variáveis físicas, químicas e microbiologias. Assim, essas análises são fundamentais na classificação e enquadramento de rios e córregos em classes de qualidade de água, padrões de potabilidade e balneabilidade humana, conforme a resolução do CONAMA 357/05.

Dessa forma, por meio dos dados de monitoramento da qualidade da água é possível identificar e intervir nas áreas mais afetadas, relacionando-se a distribuição espacial dos impactos e a eficácia das medidas mitigadoras, além de poder identificar a origem e causas dos danos causados em recursos hídricos.

Por isso, a importância de se realizar no mínimo duas campanhas de monitoramento, levando em consideração casos de obras em rodovias, a primeira antes da construção e outra após a implantação (SANTINI, 2017).

A Resolução CONAMA 357/05 dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras

providências, como a destinação das águas conforme seu enquadramento. A classe 2 é considerada pelos órgãos ambientais como o limite aceitável para abastecimento público (CONAMA, 2005).

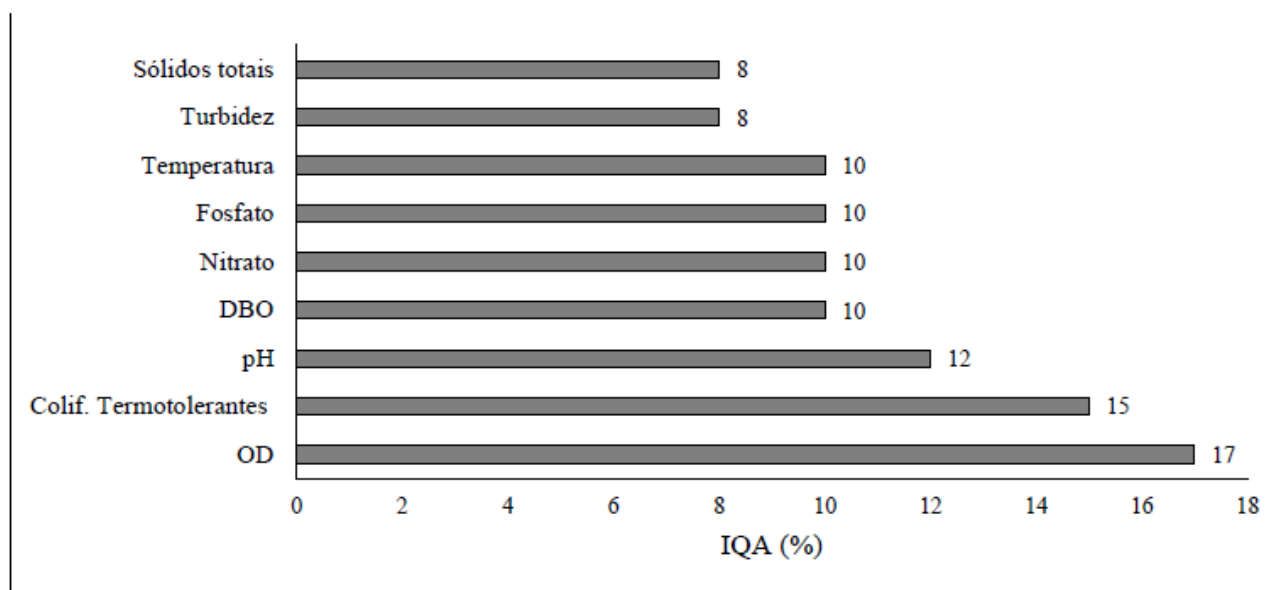
4. ESTUDO QUALITATIVO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS

Os componentes encontrados nos recursos hídricos, podem ter origem natural ou introduzidos pelas atividades humanas. Por isso, alguns parâmetros são necessários para caracterizar a água indicando se seus valores disponíveis constituem sua qualidade ou impurezas, quando superiores aos estabelecidos para o uso determinado (SANTINI, 2017).

Assim, para se conhecer e identificar os padrões de variação das condições ambientais dos corpos hídricos, os estudos de parâmetros físico-químicos são de grande importância e têm implicações nas características limnológicas como um todo (ANA, 2016). A seguir, são apresentados os parâmetros abordados neste estudo: Temperatura, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Série Nitrogenada, Fósforo Total, Coliformes Termotolerantes, Potencial Hidrogeniônico, Turbidez, Sólidos e Cor.

5. ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

O propósito do IQA - Índice de Qualidade das Águas, é fornecer ao público em geral um balizador da qualidade das águas de um corpo hídrico, o qual é calculado por meio dos resultados das análises físicas, químicas e microbiológicas. Este índice é composto por nove parâmetros, com respectivos pesos, sendo o OD responsável por 17% do valor final, o mais relevante individualmente (LIBÂNIO, 2010). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra os valores dos pesos de cada parâmetro do IQA.

Gráfico 1 - Parâmetros e pesos finais para determinação do IQA.

Fonte: (LIBÂNIO, 2010).

O IQA é calculado pelo produtório ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis que integram o índice, conforme a Equação 1.

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

IQA: Índice de Qualidade das Águas;

q_i : Qualidade do i -ésimo parâmetro, obtido da respectiva curva média de variação de qualidade;

w_i : Peso correspondente ao i -ésimo parâmetro;

n : número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

A partir do cálculo efetuado, pode-se determinar a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo IQA, variando numa escala de 0 a 100, representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 1 - Classificação do IQA para o Estado de Mato Grosso.

Classificação	Faixa de Variação
Ótima	$91 < IQA \leq 100$
Boa	$71 < IQA \leq 90$
Regular	$51 < IQA \leq 70$
Ruim	$0 < IQA \leq 25$

Fonte: (LIBÂNIO, 2010).

6-ÍNDICE DO ESTADO TRÓFICO

O Índice do Estado Trófico avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas e cianobactérias. Sendo assim, nesse índice os resultados correspondentes ao fósforo, IET(P), devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo (CETESB, 2014).

Além disso, o IET descreve as relações bióticas e abióticas de um ecossistema e a qualidade da água, o que é de suma importância para o manejo sustentável dos recursos hídricos.

O estado trófico dos rios pode ser calculado em função da concentração de fósforo total, conforme Equação 2.

$$IET (PT) = 10 * \left(6 - \left(\frac{((0,42 - 0,36 * (\ln PT)))}{\ln 2} \right) \right) - 20 \quad \text{Equação 2}$$

O índice de estado trófico pode ser categorizado em: Ultraoligotrófico, Oligotrófico, Mesotrófico, Eutrófico, Supereutrófico, Hipereutrófico, sendo o último, o estado trófico mais avançado (DAMASCENO, 2018). Assim, por meio da equação e do Tabela , pode-se classificar o estado trófico.

Tabela 2 - Classificação do Estado Trófico para rios.

Estado Trófico	Ponderação
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$
Hipereutrófico	$IET > 67$

Fonte: Damasceno, 2018.

7. ÁREA DE ESTUDO NA BR 242/MT

A área de estudo encontra-se no Estado de Mato Grosso na BR 242, entre as coordenadas 04°12'33,23"S/56°31'51,55"O e 04°07'55,34"S/55°32'39,15"O, no trecho que liga a cidade de Nova Ubatã e Paranatinga. Diante disso, ao longo desse percurso são avaliados oito rios que se encontram na área de influência onde foram construídas as pontes de concreto, sendo eles: Rio Ferro, Córrego Desejado, Rio Bonito, Rio Von Dern Stein, Rio Água Limpa, Rio Ronouro, Riobirão Capitão Jaguaribe e Rio Agrimensor Santiado.

O projeto de pavimentação e implantação da rodovia é realizado pelo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é o executor do projeto, de grande benefício para a região. Quando concluídas as obras, a BR-242 ligará os estados de Mato Grosso, Tocantins e Bahia. Em Mato Grosso, a rodovia intercepta as cidades de Sorriso, Nova Ubatã, Paranatinga, Gaúcha do Norte, Canarana e Querência.

A rodovia é utilizada como um canal de transporte da produção agrícola local. O tráfego é pesado de caminhões que transportam também os adubos e insumos, aliados BR-163, em Sorriso, possibilitam acesso aos principais portos do Brasil. Quando finalizadas, trarão mais conforto e segurança aos usuários.

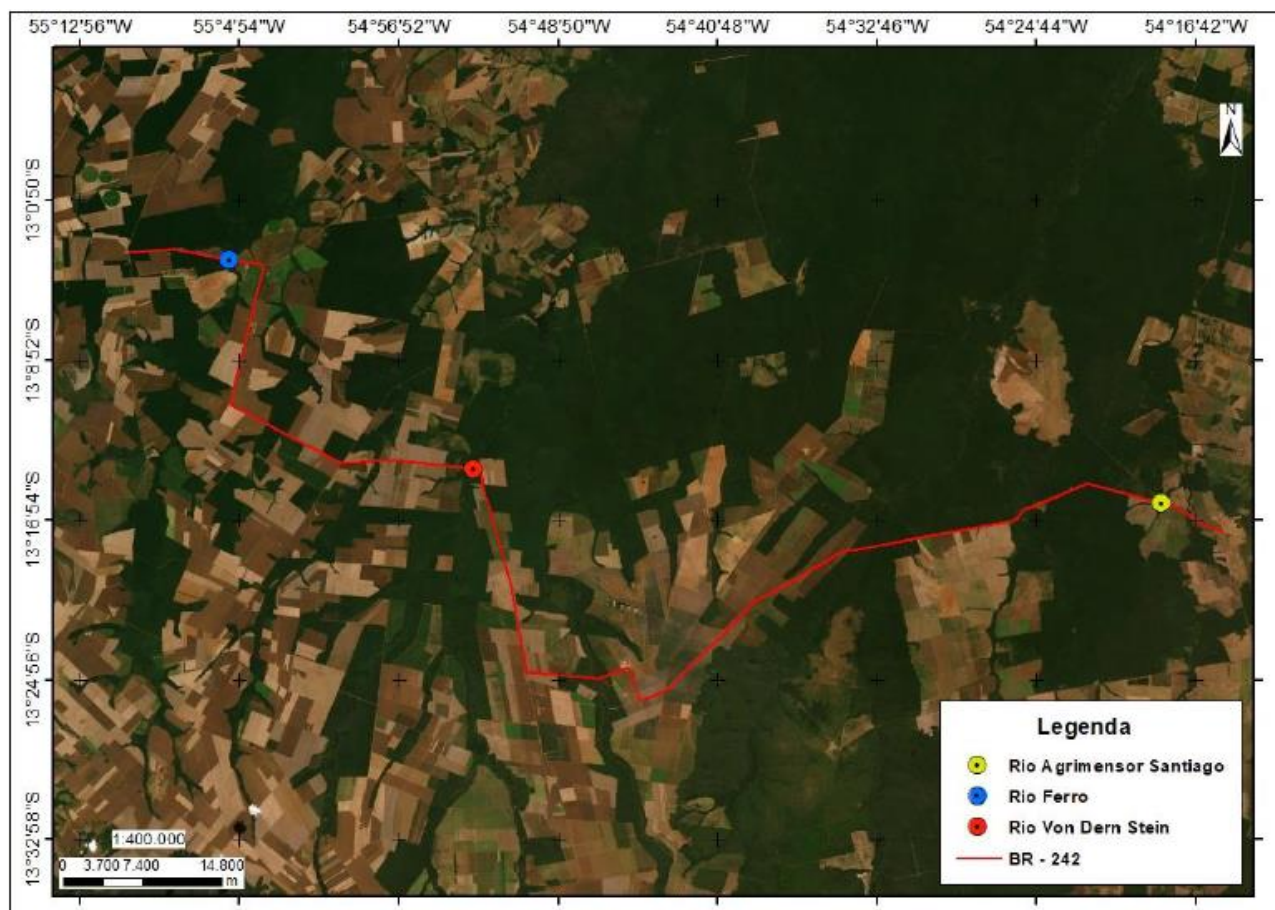
8. PONTOS DE AMOSTRAGEM NOS RIOS OBJETO DE ESTUDO NA BR242/MT

Os rios objetos deste estudo, são os Rios Ferro, Van Den Stein e Agrimensor Santiago, no trecho da rodovia entre Nova Ubatã e Paranatinga, em Área de Preservação Permanente, onde foram

construídas as pontes de concreto. Na Rodovia 242 foram construídas em um trecho com 37,3 km de extensão, entre os quilômetros 624,60 e 661,90, com 12,8m de largura cada.

Desse modo os rios selecionados para avaliar a influência da construção da Rodovia, juntamente com as pontes de concreto, foram selecionados estrategicamente, de modo que fosse possível analisar os dois extremos e o centro da Rodovia. Os rios objetos deste estudo estão localizados na Figura 2.

Figura 1 - Mapa de localização dos rios Ferro, Van Den Stein e Agrimensor Santiago.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os mananciais estão localizados nas coordenadas geográficas identificadas na Tabela 3. No entorno da região não existem residências ou indústrias, apenas áreas agrícolas e para criação de gado ou com a vegetação ciliar preservada.

Tabela 3 – Coordenadas geográficas dos rios analisados neste estudo.

Rios	Latitude	Longitude
Rio Ferro	13° 2'44.79"S	55°12'19.23"O
Van Den Stein	13°14'20.60"S	54°53'12.18"O
Agrimensor Santiago	13°15'54.06"S	54°18'26.28"O

9. LEVANTAMENTO DE DADOS

Os dados apresentados foram obtidos dos Relatórios Semestrais do Projeto de Gestão Ambiental para as Obras de Implantação e Pavimentação da Rodovia BR-242/MT. O DNIT, em parceria com a Universidade Federal de Mato Grosso, são os responsáveis pelo Projeto de Gestão Ambiental e Execução dos Programas Ambientais.

Foram utilizados dados de três campanhas, sendo elas: antecedente a construção das pontes, realizado no mês de setembro de 2017, no período de agosto de 2018, durante a construção e a última após a entrega da obra no mês de abril de 2019.

Em cada ponto de amostragem foram realizadas coletas a montante e a jusante do local de construção das pontes, sendo coletadas 2 amostras montante e jusante, com análises *in loco* e análises físico-químicas e biológicas laboratoriais, permitindo assim avaliar as alterações ocorridas em decorrência de sua implantação. A metodologia consistiu em coleta de amostras, seguindo os procedimentos do STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTER DA AWWA, 22ª edição.

As variáveis utilizadas para estudo foram: Temperatura da água, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Nitrogênio Kjeldahl, Fósforo Total, Coliformes Termotolerantes, Potencial Hidrogeniônico, Turbidez, Resíduo Total e Cor.

Diante disso, os resultados serão comparados com a Resolução CONAMA nº357 para rios classe 2, juntamente com o cálculo para determinação do IQA e IET, os quais foram desenvolvidos com o intuito de possibilitar aos agentes de tomada de decisão e a público maior facilidade de saber a natureza ou o estado no qual se encontram os ecossistemas.

10. ESTUDO QUALITATIVO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

Inicialmente, na primeira etapa realizou-se a seleção dos rios a serem analisados ao longo da construção da BR-242/MT, juntamente com o levantamento de informações sobre período de obra

das pontes nos respectivos rios e levantamento do banco de dados das análises físicos químicos e microbiológicos, no período de monitoramento.

Na segunda etapa, foram gerados gráficos com os resultados das campanhas de monitoramento, antes da construção, durante e após. A partir disso, os resultados foram avaliados com a Resolução CONAMA Nº357.

Na terceira etapa calcula-se os indicadores de qualidade, Índice de Qualidade da Água (IQA) e o Índice de Estado Trófico (IET), por meio da metodologia proposta pela Cetesb.

Por fim, realiza-se a análise da interferência do empreendimento na qualidade dos recursos hídricos, por meio das análises físico-químicas e microbiológicas, IET e IQA. Assim, recomendar as medidas mitigadoras que auxiliem na conservação do meio ambiente e na qualidade de vidas das comunidades que utilizam desses recursos.

11. RESULTADOS DOS ESTUDOS

Os resultados obtidos nas três campanhas análises são apresentados por meio de tabelas e gráficos para melhor visualização das possíveis alterações ocorridas em cada período. Por meio disso, comparou-se com os limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05.

11.1 TEMPERATURA

Na Tabela 4 são apresentados os valores da medição *in loco* da temperatura da água. Os valores encontrados estão apresentados na tabela a seguir, expressos em graus Celsius (°C).

Tabela 4 – Resultados de temperatura (°C) nos pontos de monitoramento.

Temperatura	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	21,3	21,3	22,1	22,3	21,1	21,3
Em construção	22,6	22,8	20	21	24,3	23,7
Pós-Obra	24,5	24,5	22,7	22,7	20,4	18,5

De modo geral, não houve grande variação na temperatura nas coletas realizadas. As temperaturas foram maiores após a construção, com exceção do rio Agrimensor Santiago, que houve um aumento durante o período de obra e após a conclusão a temperatura reduziu.

A Resolução CONAMA não faz especificações sobre os parâmetros temperatura da água. No entanto, os valores encontram-se aceitáveis para manutenção do equilíbrio do curso hídrico e com baixa variação no período avaliado.

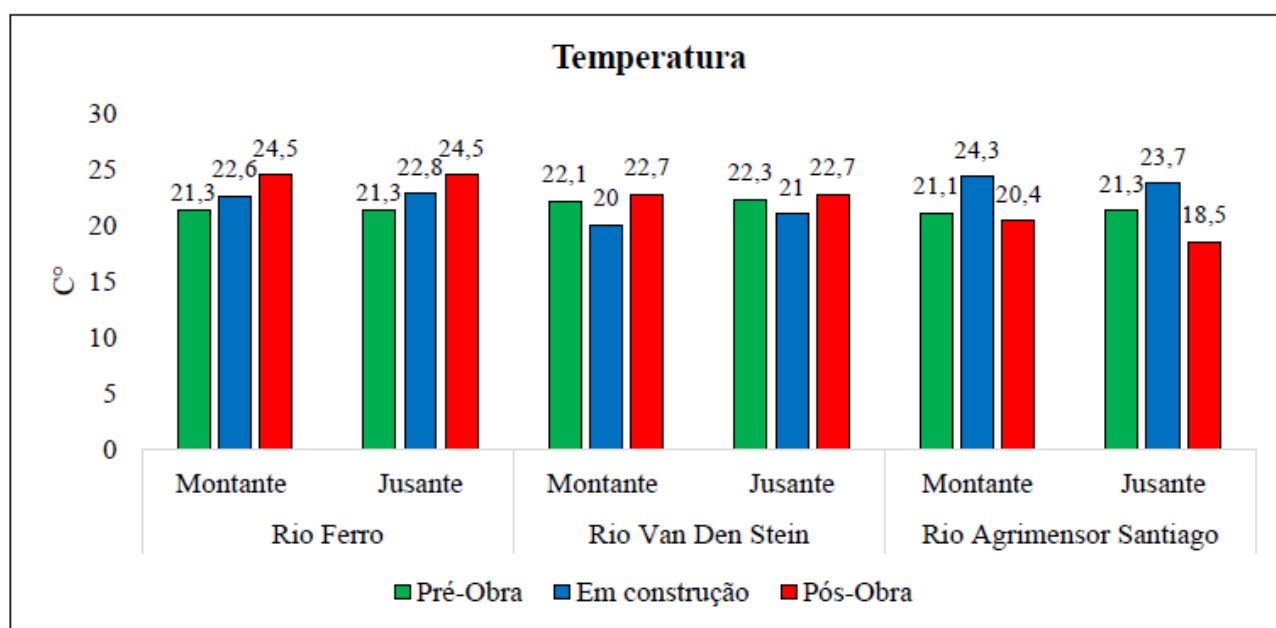
Levando em consideração a média dos três rios analisados, nota-se que não houve grande mudança entre a montante e jusante das pontes e a temperatura mais baixa foi no período antecedente as obras. A Tabela 5 demonstra a média dos três rios, levando em consideração a fase de construção das pontes

Tabela 5 – Médias de temperatura dos três rios monitorados.

Médias - Temperatura		
Período	Montante	Jusante
Pré-Obra	21,30	21,30
Em construção	22,60	22,8
Pós-Obra	22,70	22,7

Águas mais frias auxiliam na maior solubilização do oxigênio. No Gráfico 2 é possível observar a evolução no monitoramento da temperatura.

Gráfico 2 - Variação de temperatura antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio

11.2 OXIGÊNIO DISSOLVIDO

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da medição *in loco* de oxigênio dissolvido dos três rios monitorados. As concentrações de OD estão expressas em mg/l.

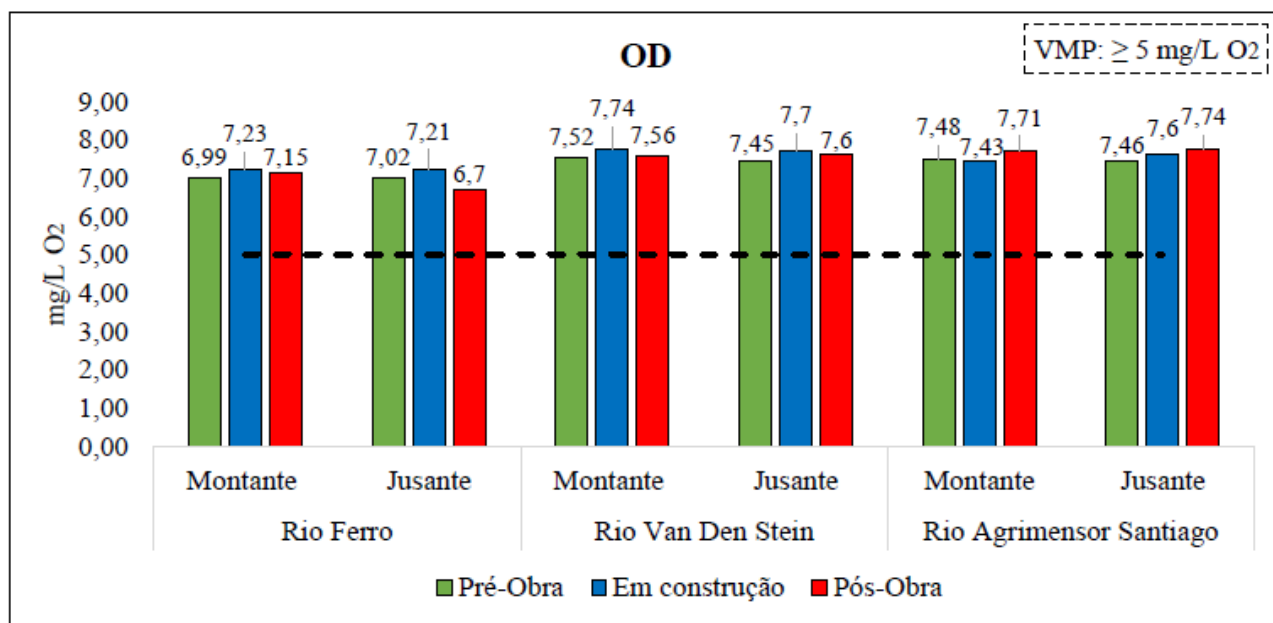
Tabela 6 – Resultados de oxigênio dissolvido nos pontos de monitoramento.

OD	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	6,99	7,02	7,52	7,45	7,48	7,46
Em construção	7,23	7,21	7,74	7,7	7,43	7,6
Pós-Obra	7,15	6,7	7,56	7,6	7,71	7,74

Em todos os pontos analisados, independente do período, a concentração de OD foi superior ao limite mínimo estabelecido por lei para rios Classe 2, de 5,0 mg/L, indicando boas condições para preservação da vida aquática.

Nota-se que não há grande variação na concentração de oxigênio dissolvido nas campanhas, sendo os resultados correlacionados a temperatura, uma vez que temperaturas mais elevadas diminuem a solubilização dos gases. A Gráfico 3 demonstra os resultados obtidos de oxigênio dissolvido em mg/L.

Gráfico 3 - Variação de oxigênio dissolvido antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio autor (2020).

Em corpos d'água a solubilidade do OD varia com a altitude e temperatura, levando em consideração o nível do mar, na temperatura de 20°C, a concentração de saturação da água varia em torno de 9,2mg/L. Dessa forma, valores superiores a saturação são indicativos de algas, as quais geram oxigênio por meio da fotossíntese e valores bem inferiores a saturação são indicativos da presença de matéria orgânica, provavelmente esgoto (SPERLING, 2014). Levando isso em consideração e os resultados obtidos, as concentrações de OD encontram-se em boas condições, sem causar danos a sobrevivência dos peixes, uma vez que os resultados não estão nem muito altos e nem muito baixos.

Na média de oxigênio dissolvido dos três rios analisados, nota-se que não houve grande mudança entre a montante e jusante das pontes. Sendo que os resultados mais elevados de OD foram durante e após a construção das pontes, sendo esses resultados correlacionados com a temperatura, uma vez que nesses períodos a temperatura foi mais baixa. A Tabela 7 demonstra a média de OD dos três rios, levando em consideração a fase de construção das pontes.

Tabela 7 - Médias de OD dos três rios monitorados.

Médias – Oxigênio Dissolvido		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	7,48	7,45
Em construção	7,43	7,6
Pós-Obra	7,56	7,6

11.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO

Os resultados de DBO₅, estão apresentados na Tabela 8, expressos em mg/L O₂.

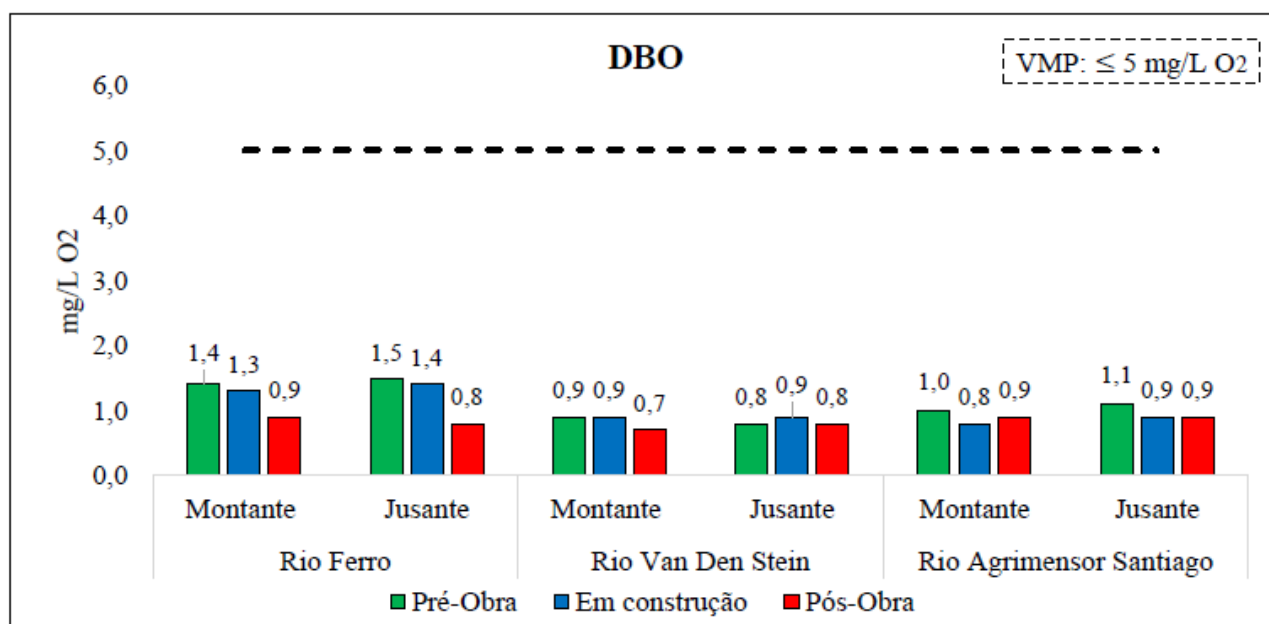
Tabela 8 – Resultados de DBO nos pontos de monitoramento.

DBO	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	1,4	1,5	0,9	0,8	1,0	1,1
Em construção	1,3	1,4	0,9	0,9	0,8	0,9
Pós-Obra	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,9

A Resolução determina que para águas Classe 2, o valor máximo permitido é de 5 mg/L O₂. Os dados analisados variaram entre 0,7 a 1,5 mg/L O₂, estando dentro do limite estabelecido pela legislação. A máxima obtida foi no rio Ferro no período anterior obra com 1,5 mg/L O₂.

Os valores encontrados apontam para boas condições dos ecossistemas aquáticos. A evolução no monitoramento deste parâmetro pode ser observada na Gráfico 4.

Gráfico 4 - Variação de DBO antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio autor (2020).

Levando em consideração a média de DBO dos três rios analisados, nota-se que não houve mudanças significativas entre a montante e jusante das pontes. Sendo que os resultados mais elevados de DBO foram anteriores a construção das pontes. A Tabela 9 demonstra a média de DBO dos três rios, levando em consideração a fase de construção das pontes.

Tabela 9 - Médias de DBO dos três rios monitorados.

Médias - DBO		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	1,00	1,10
Em construção	0,90	0,9
Pós-Obra	0,90	0,8

11.4 NITROGÊNIO TOTAL KJELDHAL

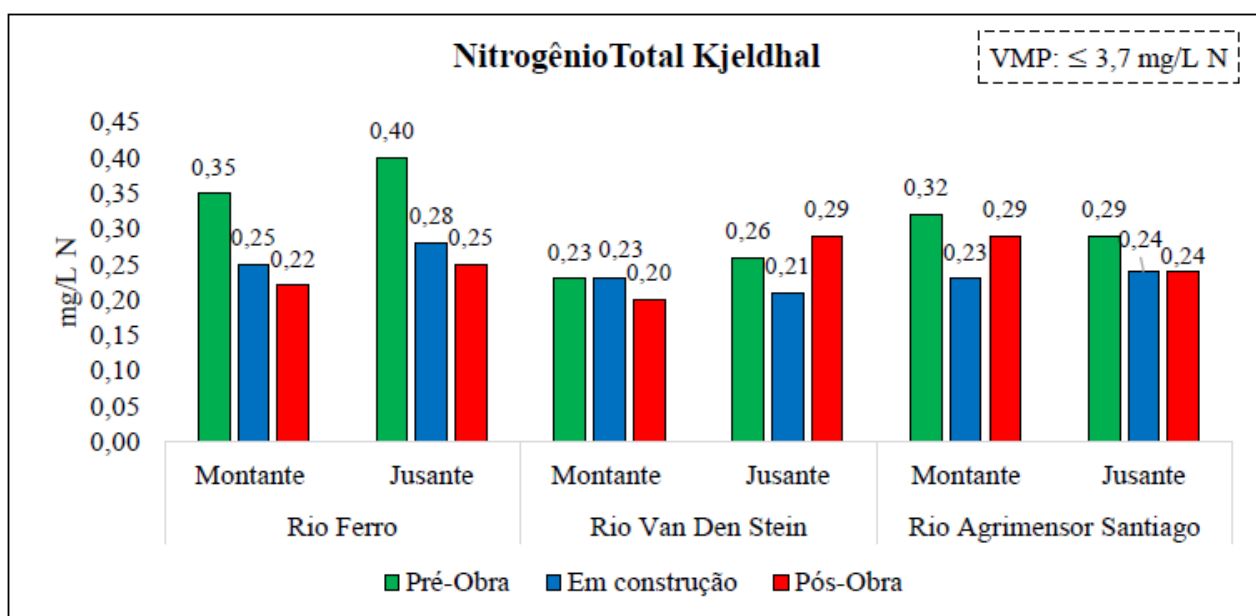
Os resultados de nitrogênio total kjeldahl estão apresentados na Tabela 10, expressos em mg/L.

Tabela 10 – Resultados de nitrogênio total kjeldahl nos pontos de monitoramento.

Nitrogênio Kjeldhal	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	0,35	0,40	0,23	0,26	0,32	0,29
Em construção	0,25	0,28	0,23	0,21	0,23	0,24
Pós-Obra	0,22	0,25	0,20	0,29	0,29	0,24

A Resolução CONAMA N°357 não estabelece um valor máximo para nitrogênio total kjeldahl em rios classe II, no entanto deixa claro que em rios com $\text{pH} \leq 7,5$, o valor máximo admissível de nitrogênio seja de 3,7 mg/l. Nota-se que em nenhuma dessas campanhas este valor foi ultrapassado. Na Gráfico 5 é possível observar a evolução no monitoramento deste parâmetro.

Gráfico 5 - Variação de nitrogênio total kjeldahl antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio autor (2020).

Conforme observado, a execução das obras não contribuiu para o acréscimo da concentração de NTK nos corpos hídricos, visto que o período de maior concentração corresponde a primeira campanha, quando não havia se iniciado a obra. As variações entre as campanhas foram pouco significativas, cerca de 0,2 mg/l.

As concentrações mais elevadas de nitrogênio em forma orgânica ou de amônia, (NKT) está associada a uma poluição mais recente, enquanto que uma poluição mais remota está associada ao nitrogênio na forma de nitrato. No entanto, nas imediações dos locais onde estão sendo construídas as pontes não existem residências ou indústrias que possam contribuir com o lançando de nutrientes, como o nitrogênio e fósforo, causadores da eutrofização de rios. Sendo nesse caso, os responsáveis pela concentração de nitrogênio total kjeldhal nos recursos hídricos os constituintes sólidos em suspensão e sólidos dissolvido (SPERLING, 2014).

Levando em consideração a média de nitrogênio total kjeldhal (NTK) dos três rios analisados, nota-se que não houve mudanças significativas entre a montante e jusante das pontes. Sendo que os resultados mais elevados foram anteriores a construção das pontes. A Tabela 11 demonstra a média de NTK dos três rios, levando em consideração a fase de construção das pontes.

Tabela 11 – Médias de nitrogênio total kjeldhal dos três rios monitorados.

Médias - NTK		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	0,32	0,29
Em construção	0,23	0,2
Pós-Obra	0,22	0,3

11.5 FÓSFORO TOTAL

Os resultados de fósforo total estão apresentados na Tabela 12, expressos em mg/L.

Tabela 12 – Resultados de fósforo total nos pontos de monitoramento.

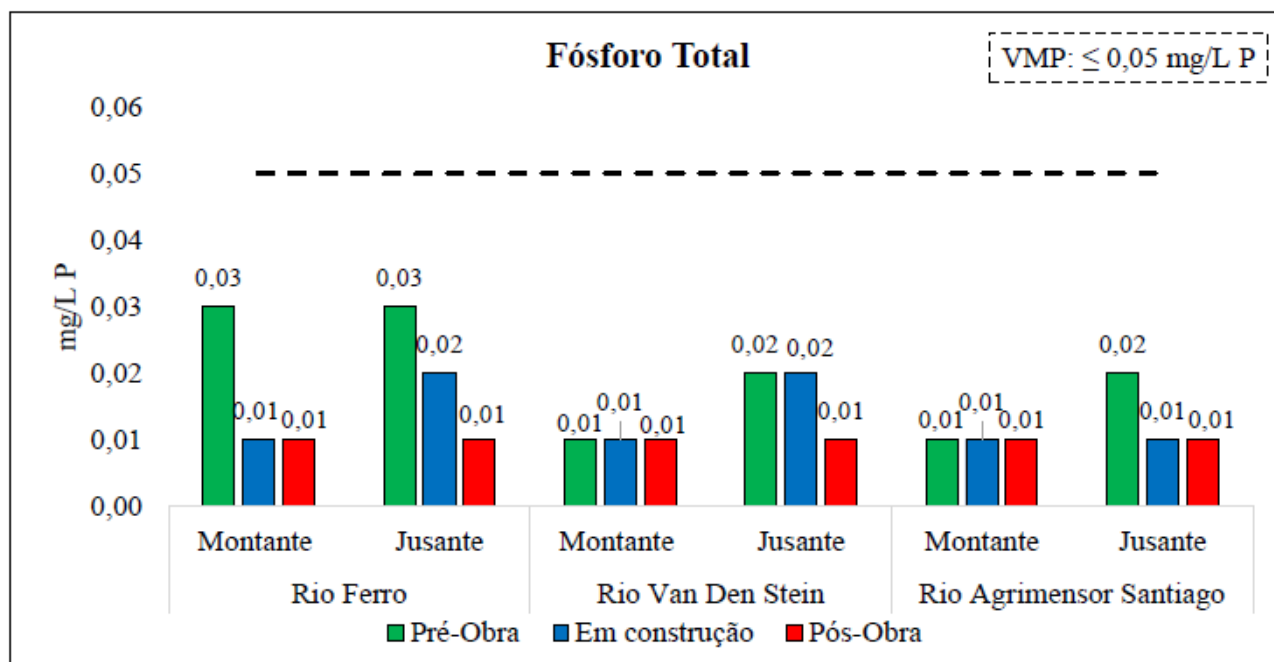
Fósforo total	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02
Em construção	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
Pós-Obra	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Assim, como o Nitrogênio Total Kjeldhal, a concentração de fósforo total é mais elevada na presença de sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos. Em virtude disso, assim como o NTK, a concentração de

fósforo total também foi mais elevada no período anterior as obras, uma vez que a rodovia não era pavimentada e a ponte no local de monitoramento era de madeira, assim com a circulação dos veículos gerando poeira no local, podendo aumentar a concentração de sólidos no corpo hídrico.

Na Gráfico 6 é possível observar a as concentrações obtidas ao longo do monitoramento deste parâmetro.

Gráfico 6 - Variação de fósforo total antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio autor (2020).

Como pode-se notar, os resultados variaram entre 0,01 e 0,03 mg/L, ou seja, baixa variação ao longo do monitoramento, sendo as maiores concentrações no período anterior e durante a construção das pontes.

Os valores são considerados baixos quando comparados ao máximo estabelecido pela Resolução CONAMA N° 357 de até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos e até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico. Neste caso, os rios monitorados são classificados como intermediários, atendendo a máxima exigida pela Resolução.

Encerrado o período de obras, os valores da concentração de fósforo para os três rios referidos, estabilizaram em 0,01 mg/l, valor inferior aos resultados obtidos na primeira campanha, confirmando que a construção das pontes causou efeitos temporários para o parâmetro descrito.

Levando em consideração a média dos resultados de fósforo dos três rios analisados, nota-se que não houve mudanças significativas entre a montante e jusante das pontes. Sendo que os resultados mais elevados foram a jusante da construção das pontes. A Tabela 13 demonstra a média de fósforo dos três rios, levando em consideração a fase de construção das pontes.

Tabela 13 – Médias de fósforo total dos três rios monitorados.

Médias – Fósforo Total		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	0,01	0,02
Em construção	0,01	0,02
Pós-Obra	0,01	0,01

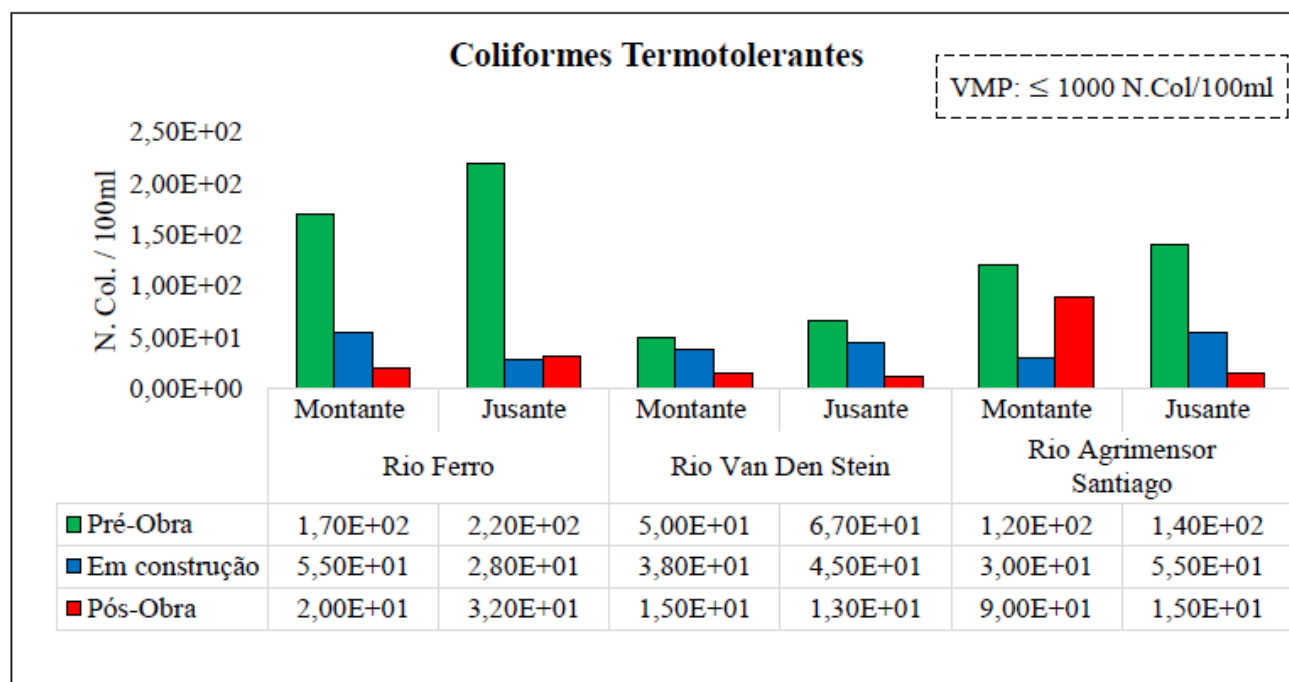
11.6 COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Os resultados de coliformes termotolerantes estão expressos na Tabela 14 em número de coliformes a cada 100 ml (N. Col/100 ml).

Tabela 14 – Resultados de coliformes termotolerantes nos pontos de monitoramento.

Coliformes Termotolerantes	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agri. Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	1,70E+02	2,20E+02	5,00E+01	6,70E+01	1,20E+02	1,40E+02
Em construção	5,50E+01	2,80E+01	3,80E+01	4,50E+01	3,00E+01	5,50E+01
Pós-Obra	2,00E+01	3,20E+01	1,50E+01	1,30E+01	9,00E+01	1,50E+01

Conforme a Resolução CONAMA N° 357, o valor máximo de coliformes termotolerantes para águas naturais e de abastecimento é de 1000/100ml. Diante Disso, os pontos de monitoramento estão em conformidade. A Gráfico 7 demonstra as concentrações de coliformes termotolerantes ao longo do monitoramento.

Gráfico 7 - Variação de coliformes termotolerantes antes, durante e após a construção das pontes.

Fonte: Próprio autor (2020).

As bactérias do grupo coliformes habitam normalmente o trato intestinal dos animais de sangue quente servindo, portanto, como indicadoras de contaminação por fezes, além de existirem naturalmente no solo e na vegetação (LIBÂNIO, 2010).

Nas imediações dos locais onde foram construídas as pontes não existem residências ou indústrias que possam contribuir com o lançamento de esgoto, contribuindo significativamente nas concentrações de coliformes termotolerantes. Sendo nesse caso, os responsáveis pelo resultado obtido animais que circulam pelo local de monitoramento.

Portanto, nota-se por meio da Figura 8, que as maiores concentrações correspondem ao período pré-obra, indicando que antes do início da obra havia uma circulação maior de animais na redondeza dos pontos de monitoramento. Dessa forma, durante a obra houve uma redução de coliforme termotolerantes nos rios monitorados e após a conclusão das pontes as concentrações não voltaram aos valores da primeira campanha, sendo assim, os resultados desse parâmetro pode ser um indicativo de que o empreendimento do ter influenciado na fauna e flora local.

Nota-se o rio Ferro apresentou mais significativamente essa influência da construção na fauna e flora, quando comparado aos outros rios que obtiveram resultados menores e com uma variação pequena

entre os pontos de jusante e montante, como pode ser visto na Tabela 15. Tabela 15 - Médias de coliformes termotolerantes dos três rios monitorados.

Tabela 15 - Médias de coliformes termotolerantes dos três rios monitorados.

Médias – Coliformes Termotolerantes		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	120,00	140,00
Em construção	38,00	45,0
Pós-Obra	20,00	15,0

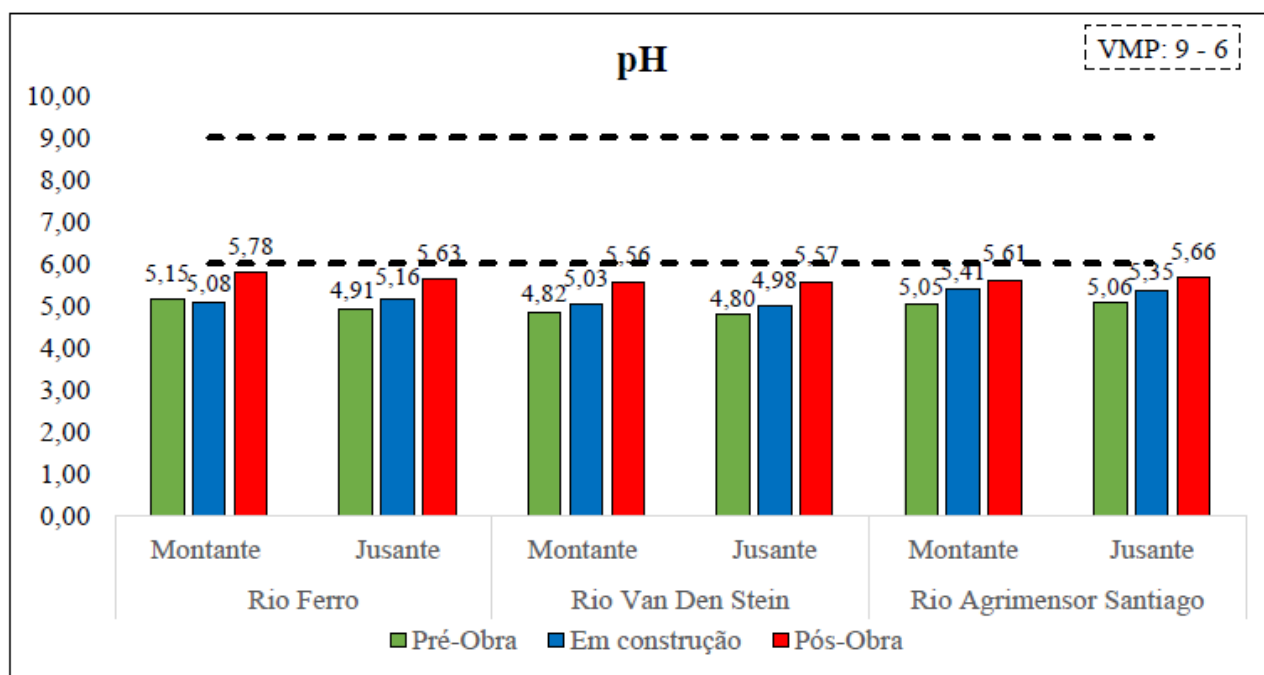
11.7 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO

Na Tabela 16, são apresentados os resultados referentes a medição do parâmetro pH para os três rios monitorados.

Tabela 16 – Resultados de pH nos pontos de monitoramento.

pH	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	5,15	4,91	4,82	4,80	5,05	5,06
Em construção	5,08	5,16	5,03	4,98	5,41	5,35
Pós-Obra	5,78	5,63	5,56	5,57	5,61	5,66

Nota-se que não houve alterações significativas em nenhum dos locais analisados. Os valores mantiveram um padrão, sendo os maiores valores obtidos na campanha pós-obra, como pode ser visto na Gráfico 8.

Gráfico 8 - Variação de pH antes, durante e após a construção das pontes.

Fonte: Próprio autor (2020).

A Resolução CONAMA N°357 estabelece que os valores de pH estejam em um intervalo entre 6,0 e 9,0. Todos os pontos amostrados apresentaram valores inferiores a 5,78, fora dos índices de normalidade para águas Classe 2.

O teor ácido verificado nas amostras pode ser decorrente da presença de ácidos fúlvicos e húmicos resultantes da degradação da matéria orgânica presente nas águas. O grande volume de folhas que caem no curso d'água, somados a velocidade, provoca o desprendimento de ácidos húmicos e fúlvicos liberados na degradação da matéria orgânica contida nas folhas, colaborando para a redução do pH.

O solo é um outro fator que pode influenciar nos resultados de pH dos corpos d'água. Dessa forma, o solo da região é classificado como Latossolo Vermelho. Segundo dados da Embrapa, mais de 95% dos Latossolos são distróficos e ácidos, com pH entre 4 e 5,5, o que pode explicar os resultados baixos de pH nos pontos de amostragem. (BORGES ET. AL, 2003).

11.8 TURBIDEZ

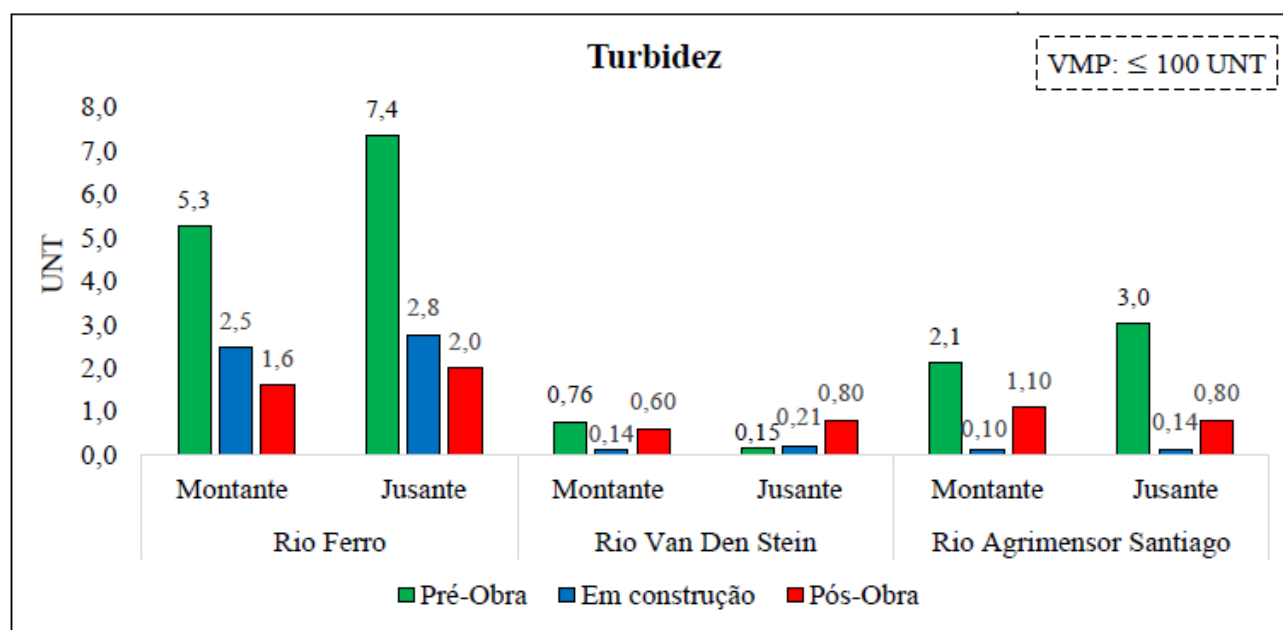
Na Tabela 17 são apresentados os resultados obtidos em relação ao parâmetro turbidez. Os valores estão expressos em UNT – Unidade Nefelométrica de Turbidez.

Tabela 17 – Resultados de turbidez nos pontos de monitoramento.

Turbidez	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	5,3	7,4	0,76	0,15	2,1	3,0
Em construção	2,5	2,8	0,14	0,21	0,10	0,14
Pós-Obra	1,6	2,0	0,60	0,80	1,10	0,80

A Resolução CONAMA N°357 estabelece que em rios classe 2 o máximo permitido do parâmetro turbidez é de 100 UNT. Sendo assim, todos os pontos amostrados atenderam a Resolução, apresentado valores inferiores 7,4 UNT, ou seja, muito abaixo da máxima permitida de 100 UNT. No Gráfico 9 é possível observar a variação dos resultados nos pontos de monitoramento.

Gráfico 9 - Variação de turbidez antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os resultados de turbidez foram maiores no período pré-obra, com exceção da jusante do rio Van Den Stein. Nas amostras coletadas no Rio Ferro, houve um decréscimo da turbidez entre o período pré-obra e pós-obra.

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, sendo os sólidos em suspensão responsável por elevar os resultados de turbidez. Além disso, levando em consideração

que na área de estudo não há contribuição de despejos domésticos, a turbidez é nos rios monitorados é decorrente das rochas, argilas ou erosões.

Esses resultados também podem ser justificados pelas condições de infraestrutura anteriores as obras de pavimentação e construção das pontes de concretos. Uma vez que, após a conclusão das obras os rios ficaram menos turvos, com concentrações ainda mais baixas, quando comparados com a primeira campanha de monitoramento, com exceção da jusante do rio Van Den Stein.

11.9 SÓLIDOS TOTAIS

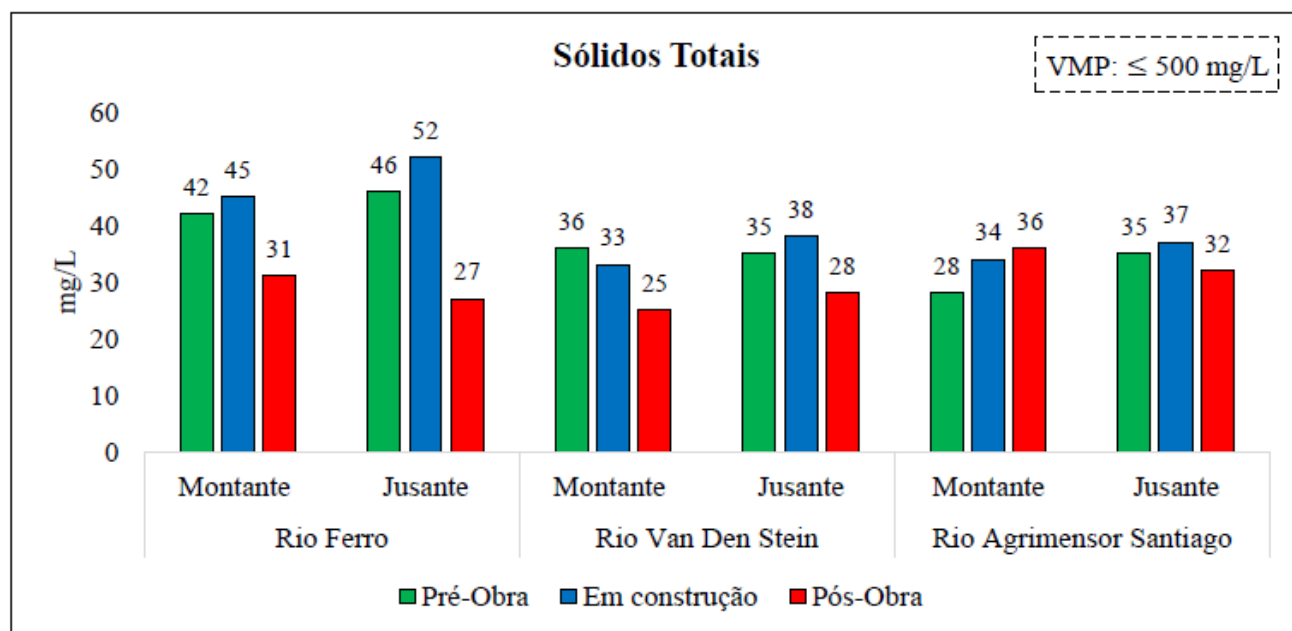
Os resultados de sólidos totais estão expressos em mg/l, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados de sólidos totais nos pontos de monitoramento.

Sólidos Totais	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	42	46	36	35	28	35
Em construção	45	52	33	38	34	37
Pós-Obra	31	27	25	28	36	32

De acordo com a Resolução CONAMA N° 357, o valor máximo para o parâmetro de sólidos totais é de 500 mg/L, para a rios Classes 2. Sendo assim, os valores obtidos não ultrapassaram o máximo estabelecido pela legislação. Os resultados desta variável nas campanhas realizadas, pode ser visualizada no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Variação de sólidos totais nos pontos de monitoramento.



Fonte: Próprio autor (2020).

O gráfico demonstra, em geral, um aumento na concentração de resíduos no período durante a construção das pontes de concreto.

Levando em consideração a média dos resultados de sólidos totais dos três rios analisados, nota-se que não houve mudanças significativas entre a montante e jusante das pontes. Dessa forma, nota-se que a construção da ponte não influenciou permanentemente na qualidade dos rios, pois os resultados após a construção foram menores. A Tabela 19 demonstra a média de fósforo dos três rios, levando em consideração a fase de construção das pontes.

Tabela 19 – Médias de sólidos totais dos três rios monitorados.

Médias – Sólidos Totais		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	36,00	35,00
Em construção	34,00	38,0
Pós-Obra	31,00	28,0

11.10 COR

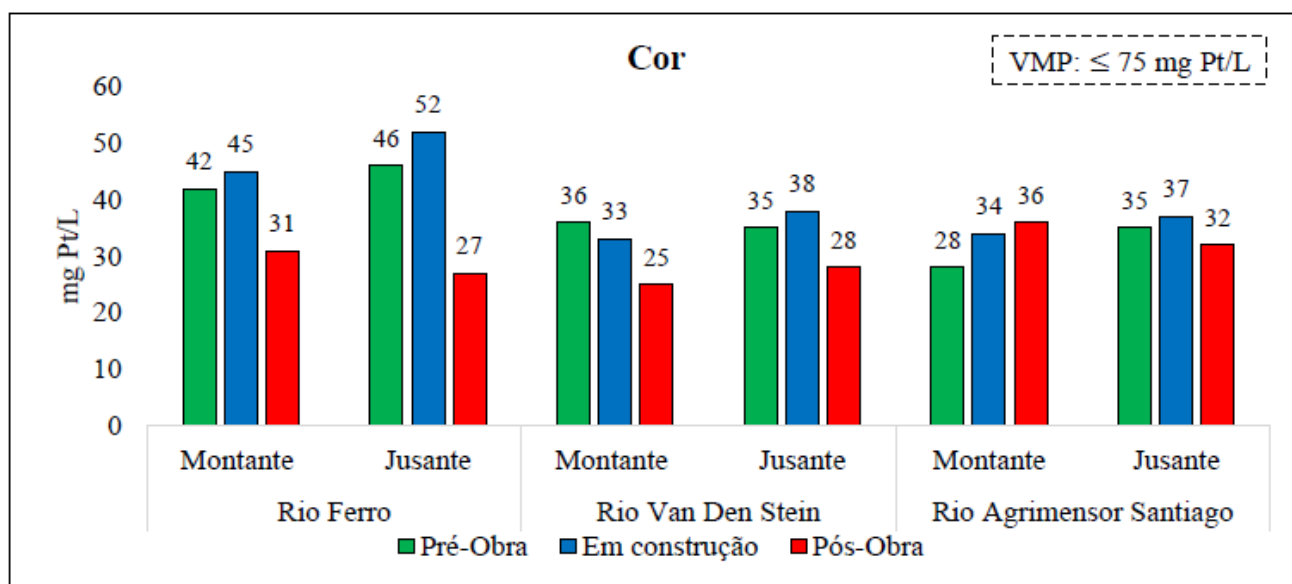
Os resultados de cor estão expressos em mgPt/l, conforme Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados de cor nos pontos de monitoramento.

Cor	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	9,1	8,9	5,7	4,1	5,0	4,8
Em construção	4,4	7,2	2,2	2,5	1,8	4,7
Pós-Obra	2,6	2,7	3,1	2,8	3,4	2,6

De acordo com a Resolução CONAMA N° 357, o valor máximo para o parâmetro de cor é de 75 mgPt/L, para a rios Classes 2. Sendo assim, os valores obtidos não ultrapassaram o máximo estabelecido pela legislação. A variação dos resultados obtidos está ilustrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.Gráfico 11.

Gráfico 11 - Variação de cor antes, durante e após a construção das pontes.



Fonte: Próprio autor (2020).

Por meio da Figura 12, nota-se as maiores concentrações de cor foram no período anterior as obras e durante as obras, a máxima obtida na jusante do rio Ferro durante a construção com 52 mgPt/L. Sendo assim, a construção das pontes de concreto não influenciou permanentemente na qualidade dos rios, pois após a conclusão das obras os valores de cor foram menores, com exceção da montante no rio

Agrimensor Santiago. Na Tabela 21 estão as médias dos resultados de cor, levando em consideração as três campanhas de monitoramento dos rios.

Tabela 212 - Médias de cor dos três rios monitorados.

Médias - Cor		
Períodos	Montante	Jusante
Pré-Obra	5,70	4,80
Em construção	2,20	4,7
Pós-Obra	3,10	2,7

11.11 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os resultados de IQA entre os períodos avaliados de pré-obra, durante e pós-obra, foram satisfatórios, sendo que os valores de IQA classificou os rios com “BOA” e “RAZOÁVEL” qualidade, sendo que durante e após a construção das pontes os resultados foram melhores, conforme Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados do Índice de Qualidade da água e classificação dos pontos de monitoramento.

IQA	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	68	65	70	69	69	69
Em construção	71	73	73	72	77	75
Pós-Obra	80	77	80	80	75	80

Os resultados antecedentes as obras foram classificados como razoável, no entanto, os valores estão próximo da faixa de classificação de boa qualidade. Esse resultado foi obtido em virtude do valor mais baixo de pH e concentrações mais elevadas de coliformes termotolerantes, sólidos, turbidez, nitrogênio total kjeldhal e fósforo total, que foram de modo geral levemente mais altos no período pré-obra.

11.12. ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

Os resultados de IET variaram pouco entre os períodos avaliados de pré-obra e pós-obra, nota-se que os valores obtidos foram classificados como “ULTRAOLIGOTRÓFICO” e “OLIGOTRÓFICO”. No período de construção e após conclusão das obras os resultados foram melhores, conforme Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados do Índice de Estado Trófico e classificação dos pontos de monitoramento.

IET	Rio Ferro		Rio Van Den Stein		Rio Agrimensor Santiago	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Pré-Obra	51,61	51,61	45,90	49,50	45,90	49,50
Em construção	45,90	49,50	45,90	49,50	45,90	45,90
Pós-Obra	45,90	45,90	45,90	45,90	45,90	45,90

De modo geral os resultados de IET foram satisfatórios, uma vez que os rios classificados como ultraoligotrófico e oligotrófico que são corpos de água considerados limpos, com baixo enriquecimento com nutrientes, em que não ocorrem interferências com os usos água.

Os resultados mais elevados de IET foram obtidos no período pré-obra e durante a construção das pontes, devido a concentração de fósforo total mais elevada nesses pontos, podendo ser justificada pela presença em maior concentração de sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos, sendo os constituintes responsáveis pela concentração de fósforo total nos recursos hídricos (SPERLING, 2014).

Assim, após a conclusão das obras, as pontes de concreto podem ter colaborado na redução de sólidos nos rios, levando em consideração que as pontes de madeira, juntamente com a rodovia sem pavimento pode dispersar sólidos nos cursos d'água.

12. CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que, em relação aos parâmetros avaliados todas as amostras atendem os valores estipulados pela Resolução CONAMA nº 357 de 2005 para rios Classe 2, com exceção do parâmetro pH, o qual ficou abaixo da mínima permitida.

O valor do pH, abaixo do índice de normalidade para águas Classe 2, está associado ao tipo de solo da região, que é classificado como ácido, com pH variando entre 4,0 e 5,5 e ao maior volume de folhas depositadas no rio, efeito da retirada da vegetação contida na faixa de domínio dos corpos d'água.

De modo geral, antes de iniciar as obras, os resultados de qualidade das águas foram moderadamente mais elevados, como as concentrações de turbidez, NTK, fósforo total, coliformes termotolerantes, cor e sólidos totais.

Dessa forma, esses resultados podem ser o reflexo das condições existentes antes de iniciar as obras, podendo haver maior circulação de animais na redondeza, contribuindo nos resultados de coliformes termotolerantes. Além disso, em rodovias não pavimentadas e pontes de madeiras podem contribuir com o aumento dos parâmetros de sólidos, cor, fósforo, NTK e turbidez.

No rio Ferro, os resultados de cor e sólidos foram mais elevados no período de construção das pontes de concreto, em virtude de erosões e ao consequente aumento do depósito de sedimentos no leito dos rios, causadas por atividades inerentes à obra, como a supressão vegetal, a movimentação do solo e a movimentação de veículos pesados.

De acordo com IQA, os corpos d'água foram classificados como de boa qualidade, durante e após as obras, indicando boas condições para a sobrevivência dos ecossistemas aquáticos. No período antecedente as obras, a qualidade das águas foi classificada como razoável, devido as concentrações mais elevadas de coliformes termotolerante e pH mais baixo, mas com valores muito próximo de boa qualidade.

Os resultados de IET foram satisfatórios, uma vez que os rios foram classificados como ultraoligotrófico e oligotrófico, indicando que os corpos de água estão limpos, em que não ocorrem interferências com os usos da água e sem risco de eutrofização. Após a conclusão das obras, a maioria dos resultados foram mais satisfatórios, como o aumento do pH, redução da concentração de fósforo, DBO, sólidos totais e cor.

Portanto, pode-se afirmar que não houve impactos significativos referentes as obras realizadas no BR 242/MT no meio físico e biótico.

13. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GOULART, M.; CALLISTO, M. Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudos de impacto ambiental. Revista da FAPAM, ano 2, n. 1, 2003.

JUNIOR, G., BRITO, E., RABELO, D., & BRITO, N. (2013). Avaliação do Índice de Qualidade da Água (IQA) as margens da Rodovia Brasileira (BR-135). REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil , 7, 16-22.

MAGALHÃES, I. A., MARTINS, R. F., & SANTOS, A. R. (dezembro de 2011). Identificação dos Impactos Ambientais Relacionados à Pavimentação da Rodovia MG 307 no Município de Grão Mogol - MG. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v.6, n.5, p. 10 - 16.

SANTINI, J. (2017). Adaptação do Índice de Qualidade da Água (IQA) para Aplicação no Monitoramento de Cursos Hídricos em um Empreendimento Rodoviário.

WEINBERG, Á. (agosto de 2013). Uso de Índices de Qualidade de Água para a Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio Guandu.

COIMBRA, C. M. (2011). Avaliação da Metodologia IQAFAL nas Bacias Contribuintes à Lagoa Rodrigues de Freitas.

ROHAN, U., SOARES, C., FRANÇA, S., & MEIRIÑO, M. (2016). Agressividade ambiental em estruturas de pontes e os impactos negativos ao meio ambiente dessas construções: Análise per-modelo pressão-estado-resposta. INOVARSE - XII Congresso Nacional de Excelência em Gestão & III INOVARSE - Responsabilidade Social Aplicada.

SPERLING, M. V. (2014). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos (4 ed., Vol. 1). Belo Horizonte: UFMG.

LIBÂNIO, M. (2010). Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água (3 ed.). Campinas, SP: Átomo.



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XII



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE