

ENGENHARIA: CRIAÇÃO, CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO

VOLUME IX



Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: criação, construção e manutenção

9ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

9ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: criação, construção e manutenção

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2022

188 f.: il

DOI: 10.37423/2022.edcl545

ISBN: 978-65-5367-167-6

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. projetos 2. implantação 3. desenvolvimento 4. sistemas I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2022.edcl545>

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

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

Dr. João Luís Ribeiro Ulhôa

Dra. Eyde Cristianne Saraiva-Bonato

MSc. Frederico Celestino Barbosa

MSc. Carlos Eduardo de Oliveira Gontijo

MSc. Plínio Ferreira Pires

Editora Conhecimento Livre

Piracanjuba-GO

2022

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	6
ANÁLISE CRÍTICA DE FALHAS EM UNIDADE DE BRITAGEM DE UMA MINERADORA	
Hélio Augusto Goulart Diniz	
José Dias Pena	
Ivo Zatti Lima Meyer	
Grack Rodrigues Gama	
DOI 10.37423/220706255	
CAPÍTULO 2	30
ANÁLISE DE FADIGA EM TORRES DE AEROGERADORES DE EIXOS HORIZONTAIS DE PEQUENO PORTE	
Peterson Bernoni Gagliotto da Silva	
Robson Gonçalves Trentin	
Gabriela Wessling Oening Dicati	
DOI 10.37423/220706268	
CAPÍTULO 3	51
UTILIZAÇÃO DE JOGO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO DE APRENDIZAGEM NA DISCIPLINA DE MATÉRIAS-PRIMAS DE ORIGEM ANIMAL	
Matheus Calixto Saraiva	
Carlos Alberto de Jesus Filho	
Gizele Almada Cruz	
Francisca Lívia de Oliveira Machado	
Juliane Döering Gasparin Carvalho	
DOI 10.37423/220706276	
CAPÍTULO 4	60
LABORATÓRIO DE CÁLCULO: APRENDIZAGEM BASEADA EM JOGOS NAS DISCIPLINAS DE EXATAS	
André Felipe de Almeida Xavier	
Paloma de Oliveira Campos Xavier	
DOI 10.37423/220706277	
CAPÍTULO 5	79
DISCRETE SMITH PREDICTOR COMPENSATOR: DESIGN, PID TUNING AND APPLICATION	
Antonio Augusto Rodrigues Coelho	
Daniel Cavalcanti Jeronymo	
DOI 10.37423/220706300	

CAPÍTULO 6	98
CRIAÇÃO DE UM PROGRAMA EM MATLAB PARA A DETERMINAÇÃO DO MODELO L DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	
Daniel Jonathas da Costa Pereira	
Gabriel Queiroz Pereira	
Jornando Prado de Oliveira Santos	
Rone Oliveira Brito	
Samuel Porto da Silva	
Diego Habib Santos Nolasco	
Leonardo Souza Caires	
DOI 10.37423/220706302	
CAPÍTULO 7	117
ESTUDOS DE DEGRADAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DO SUBSISTEMA DE CONTROLE TÉRMICO DE SATÉLITES	
Marcos Galante Boato	
DOI 10.37423/220706305	
CAPÍTULO 8	135
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO TEMPERADO EM ÁGUA POR MEIO DA METALOGRAFIA QUANTITATIVA	
Lucas dos Santos Souza	
Felipe Gomes dos Santos	
Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova	
DOI 10.37423/220706332	
CAPÍTULO 9	151
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SCADA PARA UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E SOLARIMÉTRICA USANDO PYTHON	
Julia Alves Santos	
Marcel Ayres de Araújo	
Flávio da Silva Vitorino Gomes	
DOI 10.37423/220706366	
CAPÍTULO 10	168
PREVISÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO NA PARAÍBA USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS DO TIPO LSTM	
Gustavo Basílio Lima	
Marcel Ayres de Araújo	
Flávio da Silva Vitorino Gomes	
DOI 10.37423/220706367	

Capítulo 1



10.37423/220706255

ANÁLISE CRÍTICA DE FALHAS EM UNIDADE DE BRITAGEM DE UMA MINERADORA

Hélio Augusto Goulart Diniz

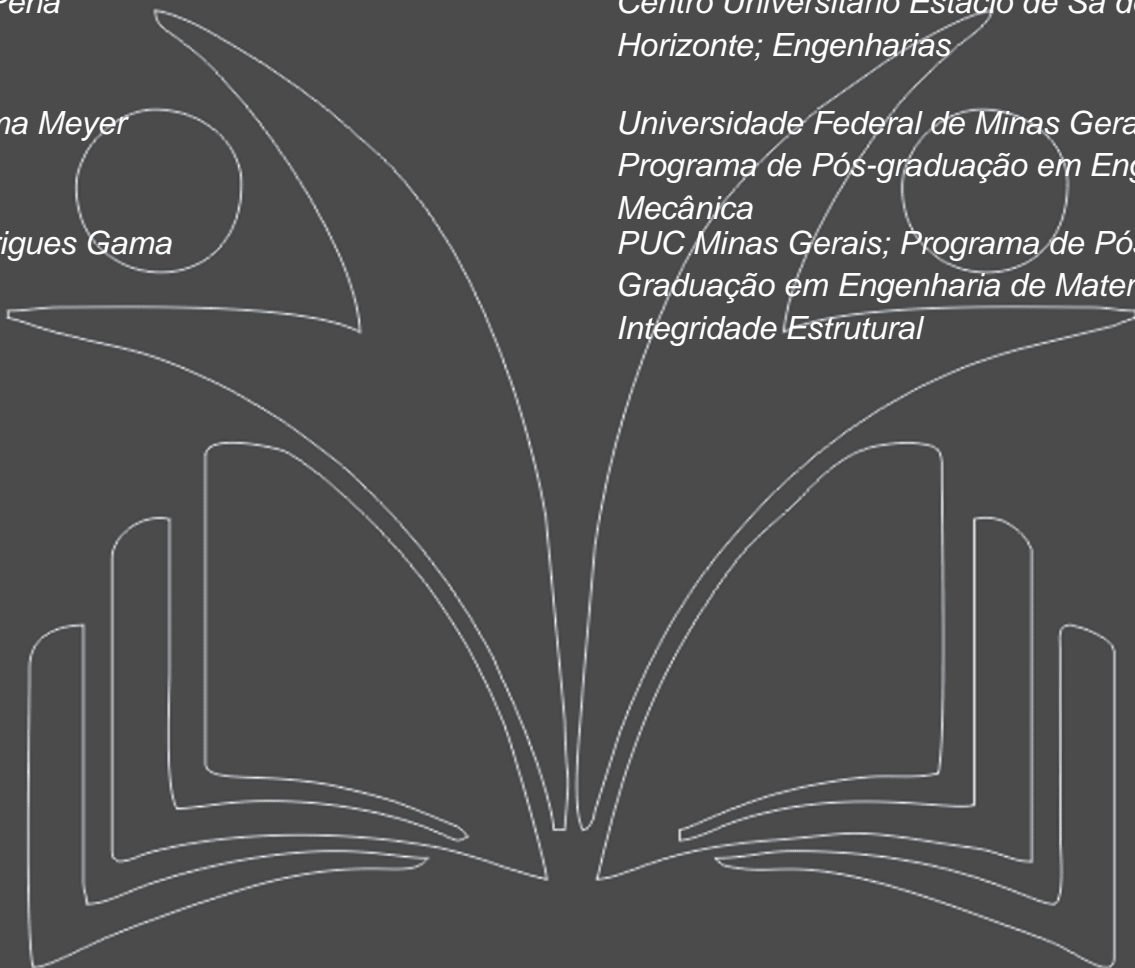
*Universidade Federal de Minas Gerais;
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica
Centro Universitário Estácio de Sá de Belo
Horizonte; Engenharias*

José Dias Pena

Ivo Zatti Lima Meyer

*Universidade Federal de Minas Gerais;
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica
PUC Minas Gerais; Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais e
Integridade Estrutural*

Grack Rodrigues Gama



Resumo. Esse artigo foi desenvolvido no contexto do processo de britagem de uma mineradora no qual se apresenta o processo de britagem, mostrado o fluxograma de processo e equipamentos típicos do setor. Problemas corriqueiros de manutenção e de operação são apresentados, assim como sugestões são discutidas para evitar ou reduzir a frequência de reincidência dos mesmos. Foi feita uma análise técnica dos problemas de manutenção e de operação do setor, na qual a produtividade e a disponibilidade são discutidas como forma de embasamento gerencial. Mostra-se a ferramenta FMEA para análise de falhas e aplica-se essa metodologia sobre um equipamento do setor de britagem, mostrando a funcionalidade e importância desse estudo no que diz respeito à tomada de decisão para evitar a falha baseada em risco e em custo.

Palavras-chave: britagem, manutenção, equipamentos, FMEA

1. INTRODUÇÃO

Paradas inesperadas de manutenção por falhas de equipamentos e intervenções pela operação geram redução de confiabilidade do processo e perdas de produtividade na unidade de britagem estudada.

Intervenções pelo pessoal da operação ocorrem, por exemplo, quando o minério entra no circuito da britagem acima da especificação de umidade e granulometria ou quando traz consigo material não britável.

No que se referem às manutenções nessa uma unidade de britagem, são comuns manutenções corretivas emergenciais, manutenções preventivas e manutenções corretivas baseadas em análise preditivas.

A ferramenta FMEA é uma metodologia para análise de falhas usada para encontrar as causas e efeitos das falhas possíveis de ocorrer em um equipamento. A partir desse estudo propõem-se soluções para atacar os principais modos de falha do equipamento baseados nos riscos e nos custos envolvidos. A sua aplicabilidade na unidade de britagem vai desde estudo das intervenções pela operação ao estudo das falhas que originam as manutenções corretivas emergenciais.

Considerando os fatos expostos, esse trabalho visa analisar as intervenções do pessoal de operação, as manutenções realizadas em equipamentos e aplicação da ferramenta FMEA em um equipamento de uma unidade de britagem de uma mineradora. Nessas análises propõem-se soluções para evitar a reincidência dos problemas e busca mostrar ao leitor as dificuldades de operação e manutenção inerentes ao setor de britagem de uma mineradora.

De início é descrito o processo e equipamentos da unidade de britagem. Logo após vem um estudo sobre os tipos de manutenção, na qual esse trabalho vai se basear. Tem-se assim um contexto na qual os problemas de operação, execuções de manutenções e análise de falhas são tratados posteriormente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. PROCESSO DE BRITAGEM

A seguir é descrito o processo de britagem de forma simplificada e contextualizada à realidade de uma unidade de britagem de uma determinada mineradora. O processo de britagem consiste basicamente em fragmentação e peneiramento do minério.

2.1.1. FRAGMENTAÇÃO DE MINÉRIO

A fragmentação mineral é o conjunto de operações, que consiste na redução das dimensões físicas de um dado conjunto de blocos ou partículas de minério, através do rompimento de sua coesão, por meio de ação mecânica externa, de forma controlada.

A redução de tamanho do minério apresenta objetivos distintos, os quais podem ser classificados em dois grandes grupos. No primeiro, o objetivo é atingir as especificações granulométricas exigidas por operações subsequentes presentes em um processo de tratamento de bem mineral. No segundo, objetivo é atingir especificação granulométrica exigida para comercialização de produtos (Chaves e Peres, 2003). No caso dessa mineradora, após o minério ser britado ele é encaminhado a uma planta de beneficiamento mineral, ou seja, o objetivo aqui recai sobre o primeiro grupo.

A fragmentação é composta por dois tipos de operações, as quais são: britagem e moagem. Pode-se definir a britagem como uma operação de fragmentação grosseira, cuja faixa operacional de tamanho para alimentação é da ordem de metro a centímetros, e o tamanho do produto britado é da ordem de centímetros. A moagem caracteriza-se por ser uma operação de fragmentação fina, cuja faixa operacional de tamanho para alimentação é da ordem de centímetros, e o tamanho do produto moído é da ordem de micrômetros (Chaves e Peres, 2003). No caso de uma unidade de britagem, interessa saber o primeiro conceito, ou seja, a fragmentação por britagem. Já que a fragmentação por moagem pertence ao processo que vem logo após a britagem e que não é foco de estudo nesse trabalho.

2.1.2. BRITADORES

Os Britadores caracterizam-se por apresentar como mecanismo preponderante de fragmentação a compressão, o qual ocorre através do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa. O mecanismo de fragmentação por compressão é o mais comum, aplicado desde a fragmentação de blocos de minério provenientes da frente de lavra (ROM) até as partículas da ordem de centímetros.

Na unidade de britagem analisada há dois tipos de britadores, um do tipo mandíbulas e dois do tipo cônicos.

O britador do tipo mandíbula caracteriza-se por apresentar, de forma simplificada, os seguintes elementos: uma mandíbula fixa, e outra móvel dotada de movimento excêntrico; uma câmara de britagem, que se caracteriza por ser o espaço entre as duas mandíbulas; uma abertura de entrada por

onde entra a alimentação do britador e uma abertura de saída local por onde sai o produto britado. A fragmentação do material ocorre quando a mandíbula móvel se aproxima da mandíbula fixa, comprimindo o material localizado dentro da câmara de britagem. Assim a ação de fragmentação caracteriza-se por ser descontínua, pois a mesma só ocorre em metade do movimento da mandíbula móvel, ou seja, quando esta se aproxima da mandíbula fixa. Na outra metade do movimento a mandíbula móvel afasta-se da mandíbula fixa, permitindo o escoamento do material, portanto não promovendo a fragmentação. (Chaves e Peres, 2003). Na figura 1 pode ser visto um modelo simples de britador de mandíbulas.

O britador do tipo cônico caracteriza-se por apresentar, de forma simplificada, os seguintes elementos: uma carcaça metálica de alta resistência fixa; um cone, interno à carcaça metálica, dotado de movimento excêntrico; uma câmara de britagem, que se caracteriza por ser o espaço entre a carcaça e o cone; e uma abertura de entrada corresponde à largura do anel de entrada, e a abertura de saída corresponde ao espaço entre as extremidades inferiores da superfície da carcaça e a superfície do cone. A fragmentação do material ocorre quando o cone dotado de movimento excêntrico se aproxima das paredes internas da carcaça, comprimindo o material localizado dentro da câmara de britagem. Diferentemente do britador de mandíbulas, o mecanismo de fragmentação no britador cônico caracteriza-se por ser contínuo, pois o cone sempre estará aproximando de um dos lados da superfície da carcaça, logo estará continuamente realizando o mecanismo de fragmentação. (Chaves e Peres, 2003). Na figura 2 pode ser visto um modelo de britador tipo cônico.

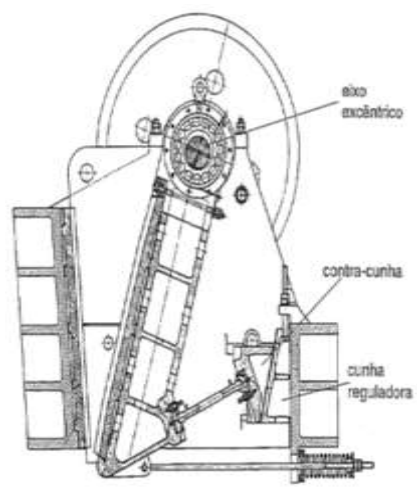


Figura 1: Britador de mandíbulas

Fonte: Chaves e Peres, 2003, p. 437



Figura 2: Britador cônico

Fonte: Metso Minerals, 2005, p. 36

2.1.3. PENEIRAMENTO DE MINÉRIO

O peneiramento é uma operação que consiste na retirada de finos do material que irá alimentar um equipamento de fragmentação, podendo satisfazer diferentes objetivos técnicos, tais como: minimizar a produção de materiais finos; minimizar o desgaste das peças de revestimento; evitar o empastelamento do britador em função da alta umidade contida em frações granulométricas mais finas de minérios; e maximizar a capacidade produtiva (Chaves e Peres, 2003).

2.1.4. PENEIRAS E GRELHAS

Na operação de peneiramento ocorre a separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada. Cada partícula tem apenas as possibilidades de passar, chamada de passante ou de ficar retida, chamada de retido (Chaves e Peres, 2003). No caso dessa unidade de britagem, os gabaritos podem ser grelhas de barras paralelas de uma grelha vibratória ou telas de malhas quadradas de uma peneira vibratória.

Na unidade de britagem analisada existem duas peneiras vibratórias inclinadas e uma grelha vibratória.

As peneiras vibratórias são constituídas por um chassi robusto, apoiado em molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório e dois suportes para as telas, chamadas de decks. Elas possuem um movimento vibratório circular ou elíptico, no qual faz com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar à tela várias vezes, sempre sobre aberturas sucessivas. Este movimento vibratório causa estratificação do conjunto de partículas sobre a tela, de

modo que as partículas maiores fiquem por cima e as partículas menores por baixo (Chaves e Peres, 2003). Na figura 3 é possível ver uma peneira vibratória inclinada.

As grelhas vibratórias são aplicadas no peneiramento primário de materiais, onde envolve matacões que podem pesar algumas toneladas. São equipamentos extremamente robustos e resistente ao desgaste, comprimento menor e ocorre a substituição das telas por grelhas de trilhos ou barras (Chaves e Peres, 2003). Na figura 4 é possível ver uma grelha vibratória.

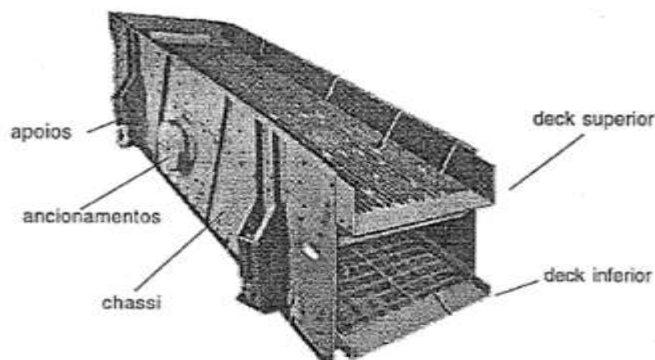


Figura 3: Peneira vibratória

Fonte: Chaves e Peres, 2003, p. 514

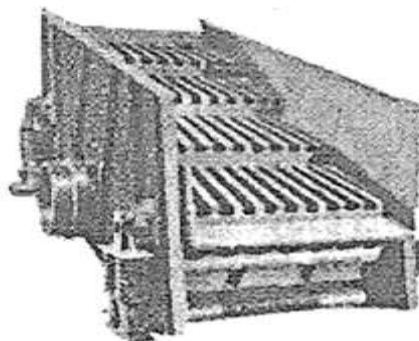


Figura 4: Grelha vibratória

Fonte: Chaves e Peres, 2003, p. 521

2.1.5. OUTROS EQUIPAMENTOS DO PROCESSO

Os principais equipamentos do processo de britagem foram apresentados e descritos com maior ênfase anteriormente, por se tratar do sistema conceitual básico de um processo de britagem. Eles são: britadores cônicos e de mandíbulas, peneiras e grelhas vibratórias.

O equipamento responsável pelo transporte do minério na linha de britagem é o transportador de correia (figura 5). Há também equipamentos que auxiliam na retomada do minério ao circuito após

esse ser armazenado em silo (reservatório) de estocagem, eles são os alimentadores, que no caso dessa unidade de britagem podem ser do tipo vibratório (figura 6) e de sapatas (figura 7).

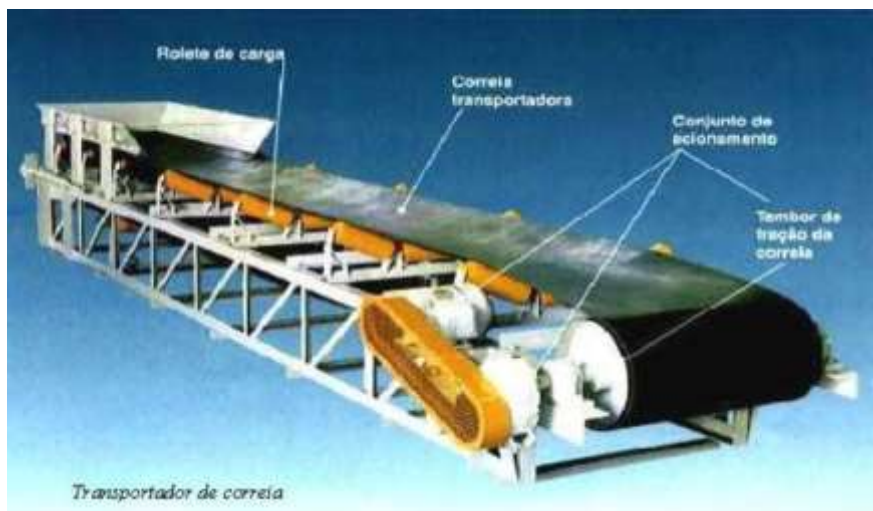


Figura 5: Transportador de correia

Fonte: Acervo técnico da unidade de britagem analisada



Figura 6: Alimentador vibratório

Fonte: Metso Minerals, 2005, p. 20



Figura 7: Alimentador de sapatas

Fonte: Metso Minerals, 2005, p. 5

Há equipamentos auxiliares ao pessoal de operação como o extrator de sucatas (figura 8) que retira material ferroso não britável dos transportadores de correia quando em operação, impedindo que esse material siga em frente e possa paralisar o circuito, como por exemplo, rasgando uma correia. Outro equipamento auxiliar é o supressor de pó (figura 9), responsável por reduzir o nível de poeira de minério quando ele acaba de passar pelo britador.



Figura 8: Extrator de sucatas

Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada



Figura 9: Supressor de pó

Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada

2.1.6. FLUXOGRAMA DO PROCESSO

Definidos os principais conceitos envolvidos quando se fala de uma unidade de britagem e mostrados os equipamentos da unidade, é apresentado na figura 10 o fluxograma simplificado do processo.

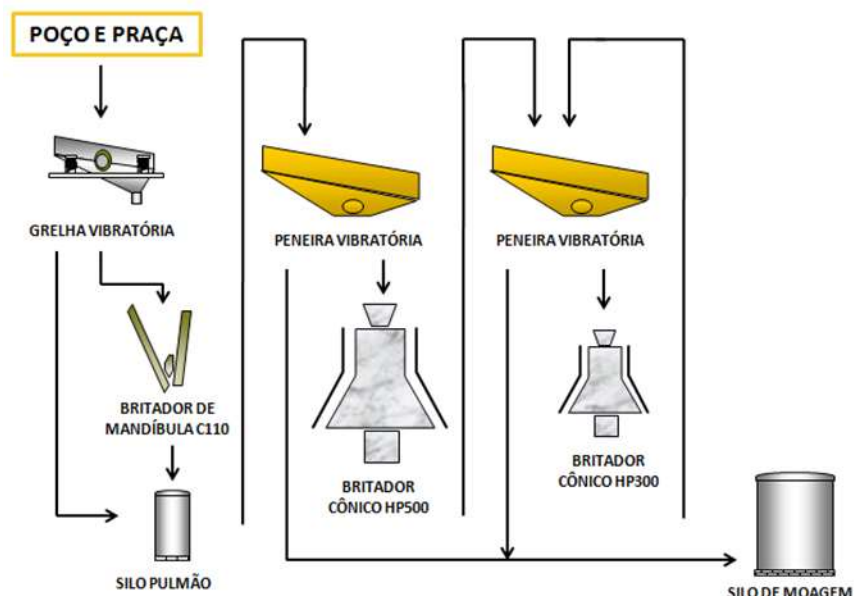


Figura 10: Fluxograma simplificado do processo

Na figura 10 estão representadas as três linhas de britagem; a primária, secundária e terciária. Na britagem primária, o minério que vem do poço (mina subterrânea) ou da praça de estocagem (cujo minério é oriundo de outra mina da empresa) passa pela grelha vibratória, o material passante vai para o silo pulmão e o não passante vai para o britador de mandíbulas e depois de britado é encaminhado ao mesmo silo. Esse silo tem a função de “backup” do sistema de britagem secundária e terciária quando há falta de minério no poço e na praça. Na britagem secundária, o material armazenado no silo é encaminhado à primeira peneira vibratória, o passante vai para o silo de moagem e o não passante vai para o britador cônico e depois de britado é encaminhado a britagem terciária. Na britagem terciária, o minério vindo da britagem secundária passa pela segunda peneira vibratória, o passante vai para o silo de moagem e o “não passante” volta para a britagem terciária, ou seja, para o mesmo destino inicial. Percebe-se que na britagem primária e secundária o circuito é aberto, ou seja, o minério passa por lá uma única vez, já na britagem terciária o circuito é fechado e o material recircula nessa etapa até atender a granulometria especificada e ir para o silo de moagem. O silo de moagem é o local para onde se destina o produto final da britagem. O minério que chega à unidade de britagem com granulometria média de 150 mm transforma-se em produto final com granulometria de 9,5 mm. Do silo de moagem em diante, trata-se do processo de beneficiamento de minério, cujo tema não é abordado nesse trabalho.

2.2. VISÃO DA EMPRESA SOBRE MANUTENÇÃO

A atividade de manutenção precisa deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz, ou seja, não basta apenas, reparar o equipamento ou instalação o mais rápido possível, mas, principalmente, mantê-lo disponível para a operação, evitar nova falha e reduzir os riscos de uma parada de produção não planejada.

A manutenção passou a ser vista como a mola propulsora de uma verdadeira revolução que pode levar uma empresa a destacar-se com diferenciais competitivos, através do aumento da confiabilidade operacional dos ativos, redução dos custos intrínsecos, redução de desperdícios, utilização racional dos recursos disponíveis e aumento das taxas de produção, dentre outros.

As manutenções que ocorrem nessa unidade de britagem e nas quais alguns exemplos e estudo de casos são desenvolvidos nesse texto são abordadas a seguir. Trata-se de manutenção corretiva não planejada, manutenção preventiva e manutenção corretiva planejada baseada em análise preditiva.

2.2.1. MANUTENÇÃO CORRETIVA NÃO PLANEJADA

Caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho menor do que o esperado. Não há tempo para preparação do serviço ou não se faz planejamento, daí o seu nome. Normalmente esse tipo de manutenção implica altos custos, pois a quebra inesperada pode acarretar perdas de produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção, além de poder afetar a segurança e o meio ambiente (Pinto e Xavier, 2013).

2.2.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Manutenção efetuada em intervalos predeterminados destinada a evitar e prevenir a ocorrência de falhas e a degradação do funcionamento de um ativo. Normalmente é aplicada quando existem aspectos relacionados com a segurança pessoal, ambiental ou da instalação que tornam mandatória a intervenção para substituição de componentes, por oportunidade em equipamentos críticos de difícil liberação operacional, dentre outros exemplos (Pinto e Xavier, 2013).

2.2.3. MANUTENÇÃO CORRETIVA PLANEJADA BASEADA EM PREDITIVA

Caracteriza-se pela ação de correção do desempenho menor do que o esperado baseado no acompanhamento dos parâmetros de condição e diagnóstico levados a efeito pela preditiva, detectiva

ou inspeção. Um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que um trabalho não planejado e será sempre de melhor qualidade (Pinto e Xavier, 2013).

2.3. DISPONIBILIDADE E PRODUTIVIDADE DA BRITAGEM

Pode-se definir a disponibilidade como a relação entre o tempo em que um equipamento ou instalação industrial está em condições mecânicas, elétricas, eletrônicas e civis adequadas para realizar a operação e o total de horas calendário previstas.

A unidade de britagem está programada para operar 24 horas por dia. Porém devido às interrupções pela operação e parada para as manutenções, acaba que sua disponibilidade de operação se reduz consideravelmente.

Dados de contagem de tempo de interrupções pela manutenção e pela operação do período correspondente ao primeiro semestre de 2012 foram analisados e são mostrados a seguir. A tabela 1 traz a estratificação dessas interrupções e mostra a indisponibilidade resultante das interrupções pela operação e pelas paradas de manutenção.

Tabela 1: Interrupções da Produção

Interrupção da Produção em relação ao tempo (%)				
Manutenção		Operação		
Preventiva e Corretiva Planejada	Corretiva não Planejada	Entupimento	Ajustes	Falta de minério
9,5	8,5	4,1	8,6	4,3

Percebe-se que as paradas pela manutenção são do tipo corretiva não planejada e preventiva que inclui a corretiva planejada, que passa por uma análise preditiva, esta última com um percentual um pouco maior. É sabido que as interrupções por manutenção corretiva são as que mais impactam na produtividade. Já para as interrupções pela operação, tem-se o problema de entupimento que será descrito nesse trabalho, falta de minério tanto do poço quanto da praça de estocagem (problema que infelizmente faz parte da rotina de trabalho da unidade, pois depende do envio do minério pelo poço e pelo transporte por caminhões do minério de outra mina da empresa até a praça) e por último e mais representativo, os ajustes. Esses ajustes englobam as paradas do silo pulmão vazio, que funciona como “backup” das britagens secundária e terciária; atuação dos extratores de sucatas que precisam de suporte para não permitir que material não britável rasgue as correias; limpeza de braços dos

britadores cônicos para retirar material não britável e não ferromagnético; regulagens de equipamentos e liberação da sala de controle, dentre outros.

A tabela 2 mostra de forma geral a disponibilidade do tempo para a manutenção, para as intervenções pela operação e para a produção de britagem de minério.

Tabela 2: Disponibilidade Global

Disponibilidade Global em relação ao tempo (%)		
Manutenção	Operação	Produção
18,0	17,0	65,0

Pela tabela 2, vê-se que a disponibilidade para a produção no período avaliado foi de 65%. Nesse período também foi registrado uma produção média de 267 tonelada/hora, levando em consideração os dados da indisponibilidade de produção. A produção mensal é de 125.000 tonelada/mês. Enfatizando ainda mais os dados, a previsão de operação da britagem que era de 24 horas, se reduz a 65% desse tempo, ou seja, 15,6 horas efetivamente de produção. O restante do tempo é gasto, praticamente de forma igual, entre manutenções e intervenções de operação.

2.4. ANÁLISE DE INTERVENÇÕES PELA OPERAÇÃO

A seguir são mostrados alguns problemas nos quais há intervenção por parte do pessoal de operação, correspondendo a 17% da indisponibilidade produtiva da britagem no período avaliado, conforme a tabela 2.

Na figura 11 está registrado o problema de entupimento por excesso de umidade do minério vindo do poço. A umidade estabelecida do minério é de 3%, porém nessa situação o percentual de umidade está bem acima. Essa situação causa a interrupção do transportador de correia por sobrecarga de peso, afetando mecanicamente o conjunto de acionamento do transportador; o transbordamento dessa lama (minério altamente úmido) contribui para sujeira do local, criando dificuldade para o acesso da área; a contaminação de outros componentes do transportador de correia, como por exemplo, os roletes, acelerando o desgaste dos mesmos. Caso esse minério prossiga, causa entupimento na grelha ou no britador primário, e se ainda passar, causa maiores danos ao ser armazenado no silo pulmão nessa forma úmida. Do silo pulmão para as britagens secundária e terciária, o minério com excesso de umidade entope as telas das peneiras vibratórias, reduzindo sua capacidade de peneiramento e fazendo o material circular por maior tempo. O correto é esse minério

ser encaminhado para a praça e secar a ação do tempo, conforme é feito, ou então passar por um controle do pessoal do poço antes de subir nesse estado.

Na figura 12 está registrado o momento de entupimento do britador de mandíbulas por matacões. Conforme já dito, o tamanho médio do minério que chega a britagem é de 150 mm, porém o minério oriundo da praça pode possuir granulometria bem superior, como neste caso. Esse problema causa a parada da linha de britagem primária por várias horas. Esses matacões devem ser retirados por pinça hidráulica, e disponibilizar na área da praça um rompedor hidráulico para desfazer os matacões antes que eles entrem na linha de britagem e cause esse entupimento.



Figura 11: Entupimento por excesso de umidade. Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada



Figura 12: Entupimento por matacões

Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada

Um fato inerente à rotina da britagem é a presença de material não britável junto ao minério a ser britado. Conforme dito, há equipamentos como o extrator de sucatas (figura 8) responsável por retirar o material ferromagnético não britável dos transportadores de correia que recebem esse minério

vindo do poço ou da praça. A falha desse equipamento em atuar por estar parado pela operação, ou quando é usado um detector de metais em vez do extrator, que no caso precisa da assistência da operação quando um não britável é capturado, pode ocasionar sérios danos às correias e a linha de britagem ficar para por várias horas até uma emenda ser feita nas mesmas.

A figura 13 registra um material ferromagnético que causou o rasgo da correia que o transportava. O material agarra nas paredes do transportador e em contato com a correia atua como uma lâmina, rasgando-a. Esse material não foi captado pelo detector de metais, por este estar saturado de materiais que não foram removidos pelo pessoal de operação ou o pelo equipamento estar inoperante naquele instante. A solução do problema requer a substituição do detector de metais, que requer a presença da operação para retirar o material capturado, por extrator de sucatas, pois este possui um sistema dinâmico de funcionamento e remove automaticamente o metal capturado. É importante que a operação mantenha esses equipamentos atuando quando o transportador estiver funcionando, ou no caso de manutenção nos mesmos, a linha de transporte seja interrompida até eles entrem em operação novamente. Para agravar a situação de rasgo de correias, esse problema também ocorre quando lamelas do minério, ou seja, em pedras formato de lâminas entram no circuito e agarram nas paredes do transportador provocando o corte da correia. Na figura 14 está registrada essa situação. A operação deve atentar a esse formato de minério, removendo-o ou rompendo-o dependendo do caso.



Figura 13: Rasgo de correia por material metálico. Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada



Figura 14: Rasgo de correia por lamela do minério. Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada

2.5. ANÁLISE DE INTERVENÇÕES PELA MANUTENÇÃO

Pela tabela 2, percebe-se que 18% da indisponibilidade produtiva da unidade de britagem no período avaliado é devida as manutenções. Desse percentual, praticamente a metade é devido a corretivas emergenciais. A seguir são avaliados os impactos causados pelas falhas de equipamentos e soluções são sugeridas. A importância da análise preditiva em identificar se determinado ativo está próximo de falhar é estudada, que caso ocorresse, entraria no grupo de manutenção emergencial. As manutenções preventivas também são exemplificadas.

Como contextualizado na parte de intervenções pela operação, o rasgo de correia paralisa o transportador de correia (figuras 13 e 14) e aquele setor do circuito de britagem fica inoperante. Dependendo do tamanho do estrago à correia, o reparo só poderá ser feito por uma empresa terceirizada. Recai no caso de um reparo emergencial, no qual até o serviço ser contratado e efetuado, várias horas de produção se perdeu dependendo da criticidade do setor na qual aquela correia faz parte. Logo as recomendações já discutidas quanto aos equipamentos auxiliares como extratores de sucatas e atenção do pessoal da operação são de alta relevância para evitar esse transtorno.

Também foi contextualizado o problema gerado pelos matacões que entram no circuito de britagem. Além da perda produtiva causada pelo tempo em que o pessoal de operação gasta para retirar o mataco do circuito de britagem, danos a estrutura física dos transportadores de correia podem ocorrer devido ao peso e ao impacto proporcionado por um mataco ao cair. Pode haver quebras de cavaletes e longarinas que compõe a estrutura física do transportador (figura 15), danos irreparáveis aos roletes (figura 16) que suportam e permitem o movimento da correia, exigindo sua substituição. Dependendo das proporções dos danos, aquele setor do transportador tem que ser reparado para a correia voltar

a operar. As recomendações já discutidas para remoção dos matacões são de relevância para se evitar esses danos aos transportadores de correias, ou, alternativamente, sugere-se alterar a geometria e a abertura da grelha.



Figura 15: Estrutura física do transportador e sustentação da correia. Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada



Figura 16: Rolete de transportador de correia danificado. Fonte: Foto tirada na unidade de britagem analisada

Como análises de preditivas realizadas nos equipamentos de britagens, destacam-se: a análise de óleo dos conjuntos moto-redutor dos transportadores de correias e das centrais hidráulicas dos britadores; análises termográficas nos painéis elétricos da central de comando de motores; análise de vibração dos conjuntos moto-redutor dos transportadores de correias; inspeção do sistema de excitação das peneiras vibratórias; e dentre outras análises.

As análises preditivas visam saber se está na hora de programar a intervenção do equipamento e fazer uma manutenção corretiva. Busca reduzir custos de manutenção por preservar a integridade do equipamento e evitar perdas de produtividade pela falha catastrófica.

Há uma série de manutenções preventivas que rotineiramente ocorrem na britagem. Elas têm como objetivo intervir já sabendo o período médio de tempo entre as manutenções nesses equipamentos e manter a saúde e desempenho dos mesmos. Em sua grande parte são trocas de materiais de desgaste por causa inerente do processo, por se tratar de minério que proporciona elevado desgaste abrasivo nos revestimentos dos equipamentos. Exemplos são: Troca de revestimentos de chutes (calhas que transferem minério de uma correia à outra), roletes de transportador de correia, peças de desgaste de britadores e peneiras vibratórias. Também são tratados como preventivas a lubrificação dos elementos rolantes, tais como mancais dos tambores de transportadores de correias, peneiras, motores elétricos de acionamentos, dentre outros.

2.6. FMEA - FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS

A ferramenta FMEA (Análise dos Modos e Efeitos das Falhas) é um método de análise de produtos ou processos usados para identificar todos os possíveis modos potenciais de falha e determinar o efeito de cada uma sobre o desempenho do sistema, mediante um raciocínio basicamente dedutivo. É um método analítico padronizado para detectar e eliminar problemas potenciais de forma sistemática e completa (Helman e Andery, 1995).

Tem como objetivo, por meio da análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, evitar que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo, buscando assim, a confiabilidade dos mesmos. Consiste em identificar todos os modos de falha em potencial dentro de um produto ou processo, todas as possibilidades de falhas catastróficas e críticas, de tal maneira que elas possam ser eliminadas ou minimizadas através da correção do projeto do produto ou processo, o mais cedo possível (Helman e Andery, 1995).

No caso da unidade de britagem analisada, aplica-se o FMEA de processo, uma vez que a instalação já está em operação há anos e o objetivo da ferramenta recai em evitar ou reduzir a ocorrência de falhas durante o processo de operação.

A seguir é listado os passos para elaboração e implementação de uma FMEA. É válido destacar que as duas últimas etapas não são feitas por se tratar de uma aplicação inédita na unidade de britagem estudada:

1. Levantamento dos dados do sistema
2. Definição do Item e da função

3. Levantamento dos modos de falha
4. Efeitos e consequências dos modos de falha
5. Causa da falha
6. Avaliação da gravidade da falha
7. Ocorrência da falha
8. Detecção da falha
9. Cálculo do RPN – Risk Priority Number
10. Ações recomendadas
11. Responsável e prazo
12. Resultado das ações

A escala de avaliação da gravidade da falha vai de 1 a 10, sendo desde 1 para falha imperceptível até 10 para falha catastrófica. A escala de ocorrência vai de 1 a 10, sendo 1 para falha muito remota de acontecer até 10 para falha com chance muito alta de ocorrer. A escala de detecção vai de 1 a 10, sendo desde 1 para falha com alta probabilidade de identificação até 10 para falha com chance remota de identificação. O RPN indica o risco da falha para o produto e processo. Os modos de falha com mais alto RPN devem ter prioridade em sua intervenção.

De todos os problemas de operação e manutenção descritos e analisados propondo soluções, a maioria deles recai sobre o transportador de correia (figura 5). Por esse motivo uma FMEA foi aplicada sobre esse equipamento conforme apresentado pela figura 19.

Dos quinze modos de falhas levantados dos subsistemas que compõem o transportador de correias, três deles tiveram o RPN acima de 300 conforme visto na figura 17. Adotando esse referencial como base para tomada de decisão prioritária para intervenção, devem-se aplicar ações para eliminar esses três modos de falhas (MF), são eles: MF3: motor elétrico sobrecarregado, MF5: Redutor com elementos de máquinas danificados e MF11: Correia rasgada por material não britável. Na figura 18 é apresentado o mapa de risco no qual classifica os modos de falha conforme a ação recomendada em escala de prioridade em relação à gravidade e ocorrência dos mesmos.

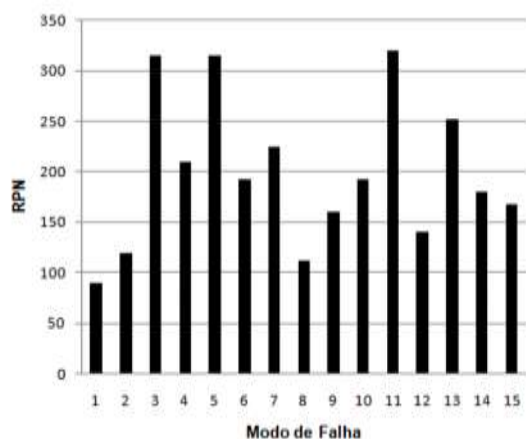


Figura 17: RPN vs MF

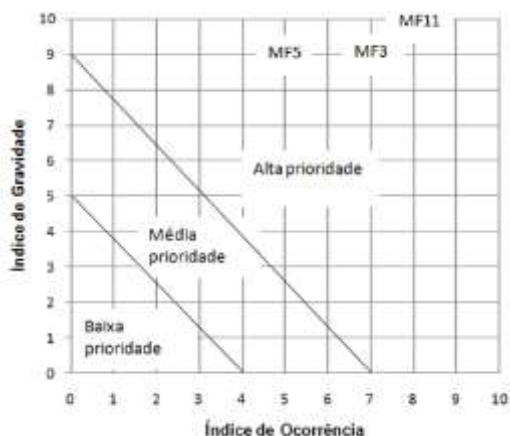


Figura 18: Mapa de Risco

SISTEMA	SUBSISTEMA	FUNÇÃO	FALHA FUNCIONAL	MODO DE FALHA	EFEITOS DA FALHA	ÍNDICE DE GRAVIDADE	ÍNDICE DE OCORRÊNCIA	ÍNDICE DE DETECÇÃO	RPN	AÇÕES (RCM)		
Transportador de Correia	Accionamento	Accionar o transportador de correia com velocidade pré-determinada	Não acciona o transportador de correia com velocidade pré-determinada	1	Motor elétrico queimado	Parada da correia	10	3	3	90	Manutenção corretiva	
				2	Motor elétrico sem energia	Parada da correia	10	4	3	120	Fiscalizar o contrato com a concessionária de energia	
				3	Motor elétrico sobrecarregado	Pode provocar parada da correia e redução de vida útil do motor	9	7	5	315	Manutenção preditiva	
				4	Redutor com vibração por desalinhamento com motor elétrico	Redução de vida útil dos componentes	7	6	5	210	Manutenção preditiva e programar manutenção corretiva	
				5	Redutor com elementos de máquinas danificados	Pode provocar parada da correia e danos aos outros componentes	9	5	7	315	Manutenção preditiva e programar manutenção corretiva	
		Fazer o atrito e contato entre o tambor de accionamento e a correia transportadora	Não faz o atrito e contato entre o tambor de accionamento e a correia	6	Revestimento do tambor solto ou desgastado	Desgaste acelerado e risco de rasgo na correia	8	6	4	192	Manutenção preventiva	
				7	Danos nos mancais de rolamento	Pode provocar parada da correia e danos aos outros componentes	9	5	5	225	Manutenção detectiva	
		Raspador	Fazer limpeza da correia	Não limpa a correia	8	Lâmina desgastada ou danificada	Desgaste acelerado dos tambores e roletes	8	7	2	112	Manutenção preventiva
		Tensionador de correia	Tensionar a correia	Não tensiona a correia	9	Danos nos tambores e nos carros tensionadores	Parada da correia por sobrecarga	10	4	4	160	Manutenção detectiva e programar manutenção corretiva
		Correia transportadora	Conduzir o minério do chute de alimentação até o chute de descarga	Não conduz o minério até o chute de descarga	10	Cavaletes e roletes danificados por quedas de matacões	Pode provocar parada da correia e danos a mesma	8	8	3	192	Manutenção detectiva e programar manutenção corretiva
	11				Correia rasgada por material não britável	Vazamento de minério e redução da vida útil	10	8	4	320	Manutenção detectiva e programar manutenção corretiva	
	12				Correia travada por material com excesso de umidade	Parada da correia por sobrecarga	10	7	2	140	Manutenção detectiva e corretiva. Limpeza pela operação	
	13				Correia desalinhada	Pode provocar parada da correia e danos a mesma	9	7	4	252	Manutenção detectiva e programar manutenção corretiva	
		Estrutura	Sustentar o transportador	Não sustenta o transportador	14	Danos na estrutura metálica trilhada por corrosão	Pode provocar parada da correia e danos a mesma	9	5	4	180	Manutenção detectiva e programar manutenção corretiva
		Chutes de alimentação	Receber e alimentar a correia com minério proveniente de outro equipamento	Não recebe e alimenta a correia com minério proveniente de outro equipamento	15	Danos ao chute e seus acessórios de vedação	Vazamento de minério e redução da vida útil de outros componentes por contaminação	7	8	3	168	Manutenção detectiva e programar manutenção corretiva

No mapa de risco (figura18), todos os 15 modos de falhas estão na região de alta prioridade por se tratar de causas comuns e que já aconteceram na unidade e que possuem elevada gravidade, pois se esses modos de falha podem parar o equipamento ou ocasionar danos graves aos seus componentes. Logo, apenas os três modos de falhas com maiores RPN foram indicados no mapa. Nota-se que no cálculo do RPN é levado em consideração o índice de detecção que diferencia os modos de falhas ao serem classificados segundo o mapa de risco que não considera esse índice.

Os três modos de falhas com maiores valores de RPN (valores bem próximos) podem ser analisados com relação ao custo versus valor de RPN, no qual se avalia o custo financeiro envolvido para promover a ação recomendada em relação ao valor do RPN, para evitar que o modo de falha aconteça e caso venha a ocorrer promover a ação para evitar os efeitos da falha. Na figura 20 percebe-se que para neutralizar o modo de falha 3 (MF3), gasta-se pouco em relação aos demais. Isso porque para monitorar a sobrecarga do motor elétrico basta aplicar técnica preditiva (monitoramento da corrente consumida do motor, por exemplo) relativamente mais barata comparada aos custos dos outros dois modos de falhas analisados a seguir. O modo de falha 5 (MF5) possui o maior custo dos três, pois será necessário monitorar o equipamento por técnica preditiva (análise de vibração, por exemplo) e caso seja detectado o problema é necessário a troca preventiva do redutor por outro que tenha no estoque, já que a empresa não faz manutenção do mesmo, exigindo assim mandar o equipamento para fora da empresa para reparo. Já o modo de falha 11 (MF11) possui um custo intermediário, pois é necessário um esforço de detecção pela operação em remover material não britável da correia que tenha passado pelo extrator de sucatas e programar manutenção corretiva para recuperar a correia caso tenha sido rasgada, envolvendo serviço terceirizado de médio custo. Os custos apresentados na figura 20 são apenas sugestivos e a título de exemplificação.

Conclui-se que pela análise de FMEA é prioritário realizar as ações recomendadas para evitar o acontecimento dos modos de falhas MF3 e MF11 e tendo maior recurso financeiro atacar o modo de falha MF5, pois envolve um custo maior.

Na figura 21 é apresentado o diagrama de Pareto relacionando os valores de RPN de forma decrescente e o percentual acumulado do RPN. Percebe-se que para os três modos de falhas abordados anteriormente, a sua somatória de risco corresponde a 32% do risco total. Conclui-se que atacando 20% dos modos de falhas, isto é, 3 modos de falhas de 15 do total, está reduzindo mais de 30% do risco de falha do equipamento.

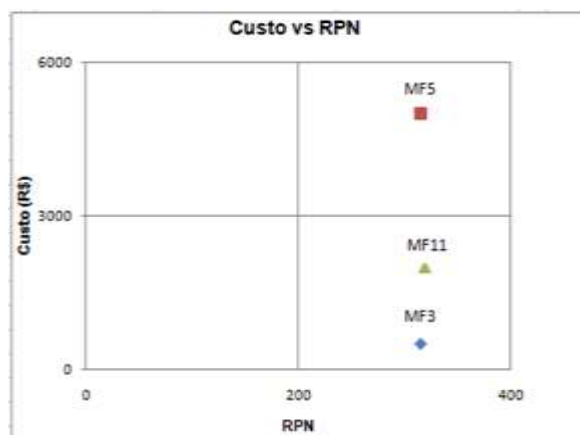


Figura 20: Custo vs RPN

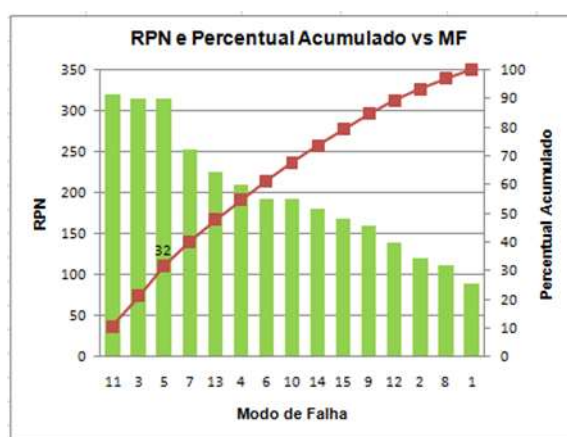


Figura 21: RPN e Percentual Acumulado vs MF

3. CONCLUSÃO

Esse artigo teve como objetivos mostrar o processo de britagem em uma mineradora, problemas de operação, de manutenção e abordagem da ferramenta FMEA. O processo de britagem foi descrito, o fluxograma de processo explicado e os equipamentos típicos e suas respectivas funções mostradas. Os tipos de manutenções realizadas no setor e suas vantagens e desvantagens foram discutidas, sendo necessária uma melhoria no sentido de reduzir os esforços com manutenção corretiva não planejada e intensificar as ações em manutenção preventiva e principalmente em manutenção preditiva.

A relação entre disponibilidade e indisponibilidade pela operação e pela manutenção no processo de britagem foi apresentada. São mostrados os problemas enfrentados pelo pessoal de operação e sugestões para evitar e reduzir os mesmos. Exemplos de manutenções corretivas emergenciais são analisadas e soluções sugeridas. Essas soluções não envolvem grandes investimentos quando comparadas com as perdas por lucro cessante com as interrupções do processo. Trata-se de aquisições

de novos equipamentos, substituições de outros e maior conscientização e treinamento do pessoal de operação. Já para os outros tipos de manutenções foram citadas as principais realizadas no setor, sem a preocupação de análise mais profunda.

Por fim, a ferramenta FMEA foi apresentada e aplicada sobre um transportador de correia, pois foi sobre esse equipamento que recaiu a maioria dos problemas de manutenção e operação do processo de britagem. Mostrou-se a aplicabilidade dessa ferramenta na busca pelas causas e efeitos das falhas, sugestões para priorizar a tomada de decisão para evitar que a falha ocorra com base no grau de risco de interrupção do equipamento e no custo envolvido na realização das medidas sugeridas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, ARTHUR PINTO; PERES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK. Teoria e Prática de Tratamento de Minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem, v. 3. 2ª Edição, São Paulo: Signus Editora Ltda, 2003, 425-659p;

HELMAN, HORÁCIO E ANDERY, PAULO R. P. Análise de Falhas: Aplicação dos Métodos de FMEA e FTA, v.11. 1ª Edição, Belo Horizonte: FCO/EEUFMG, 1995, 156p;

METSO MINERALS. Manual de Britagem. 6ª Edição, Sorocaba: Editora Publicação Técnica, 2005, 247p;

PINTO, ALAN KARDEC; XAVIER, JULIO DE AQUINO NASCIF. Manutenção – Função Estratégica. 4ª Edição, Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013, 440p.

Capítulo 2



10.37423/220706268

ANÁLISE DE FADIGA EM TORRES DE AEROGERADORES DE EIXOS HORIZONTAIS DE PEQUENO PORTE

Peterson Bernoni Gagliotto da Silva

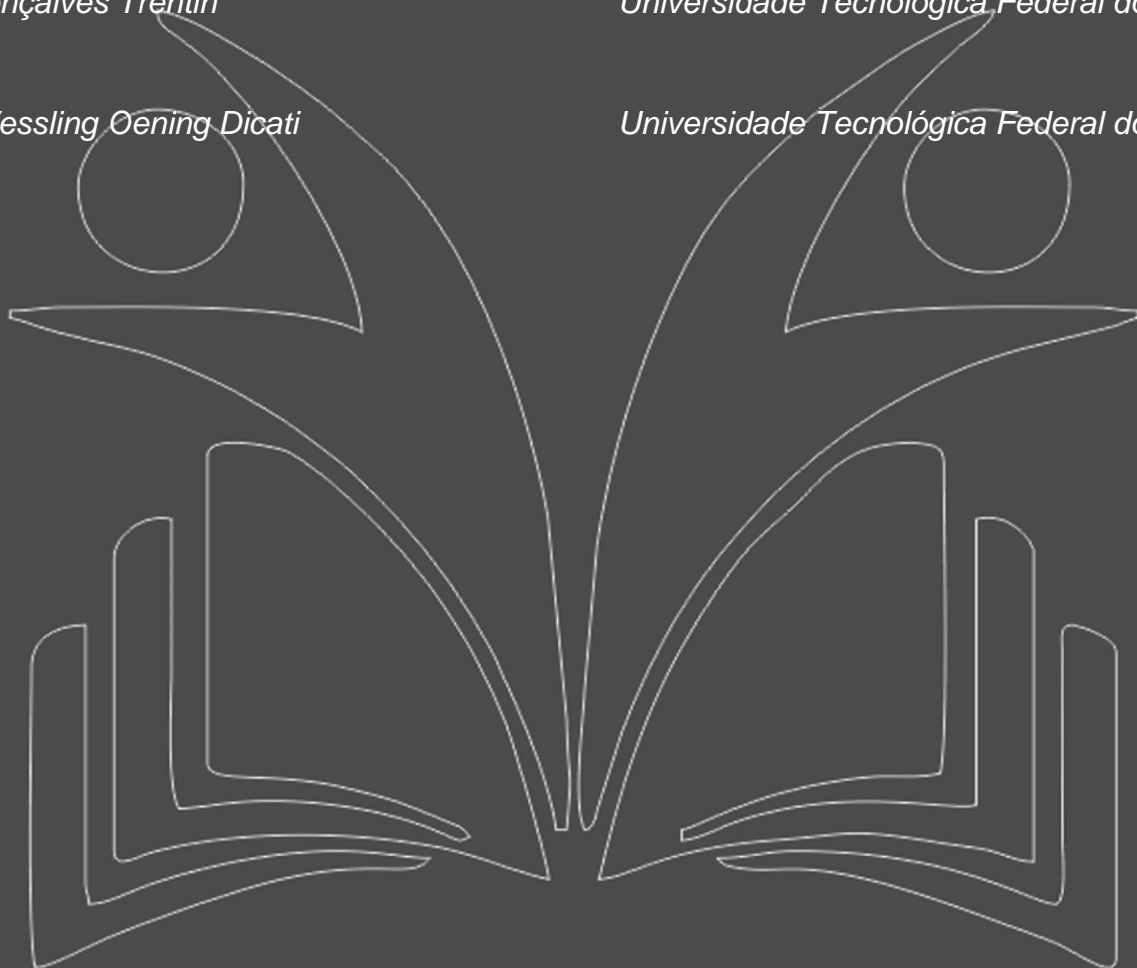
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Robson Gonçalves Trentin

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gabriela Wessling Oening Dicati

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Resumo: *A pesquisa e exploração de energias limpas e renováveis se tornou vital ao longo da evolução humana, o que se fez ainda mais claro no século XX. Dentre as que mais se destacam, encontra-se a energia eólica que faz uso de aerogeradores para a geração de energia elétrica. Visando segurança e incentivo da exploração de energia eólica no país, o presente trabalho apresenta um estudo de vida em fadiga da torre do tipo CGS3 utilizada em aerogeradores de eixos horizontais de pequeno porte, quando exposta a condições genéricas presentes na região sul do Brasil. A base para esse estudo foi uma análise por meio de elementos finitos, onde as condições de carregamento foram ditadas pela presença e ausência das ações médias do vento, conforme a norma ABNT NBR 6123:1988. Esta análise foi realizada com base no critério de falha por fadiga de Goodman Modificado aplicado para garantir uma vida mínima de vinte anos. O estudo possibilitou uma melhor compreensão da resposta da estrutura em relação à diversas solicitações de carregamento, exibindo, após os cálculos e simulações, coeficientes de segurança para falha por fadiga e escoamento bem acima do requerido, caracterizando assim, a aplicabilidade da estrutura na região pré-determinada.*

Palavras-chave: *Aerogeradores de Eixos Horizontais, Torres, Fadiga, Ponto Crítico, Coeficiente de Segurança.*

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica vem ganhando cada vez mais força e enfoque, devido à busca por energias limpas e renováveis, a fim de diminuir a emissão de gases poluentes e, conseqüentemente, problemas como a poluição do ar e o aquecimento global (CASTRO, 2009). Quando se fala da indústria de energia eólica, percebe-se tanto a sua crescente utilização quanto um grande desenvolvimento, que é notável também no Brasil (BRETSCHNEIDER, 2018).

Segundo o Balanço Energético Nacional (2018 apud EPE, 2018), atualmente, no Brasil as usinas hidrelétricas são o principal meio de geração de energia elétrica, responsáveis por cerca de 65% da produção de energia do país. Apesar da matriz elétrica brasileira ser caracterizada em grande parte por fontes renováveis e limpas, quando há escassez hídrica o país sofre com os efeitos da utilização de termelétricas para a geração de energia elétrica. Desta forma, o país é extremamente dependente das usinas hidrelétricas devido à sua utilização em larga escala. Por conseguinte, o foco se volta à utilização de outras fontes de energias renováveis, como, por exemplo, a energia eólica, onde as principais regiões de grande potencial eólico são o sul e o nordeste do Brasil (MORELLI, 2012).

Os aerogeradores, também conhecidos como turbinas eólicas, são geradores elétricos que têm como função transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica (MÜLLER, 2015). São compostos por um rotor, um nacelle, um conjunto de pás e uma torre. As pás são responsáveis pela transferência da energia cinética dos ventos para o eixo. O conjunto das pás juntamente ao cubo formam o rotor (MAIOLINO, 2014). O nacelle presente acima da torre de sustentação é onde se encontram os componentes do aerogerador responsáveis por transformar a energia mecânica do eixo em elétrica (RIVERA, 2013). A torre tem por função sustentar os demais componentes da turbina eólica, bem como, elevá-los a alturas favoráveis para a captação de energia eólica. Existem diferentes configurações de torres, as mais comumente utilizadas são as tubulares. Tal componente é geralmente fabricado em aço e possui um aumento de seu diâmetro desde seu topo até a base (PESTANA, 2016). Segundo Rivera (2013), os aerogeradores podem ser classificados quanto a sua potência nominal e a posição do eixo do rotor. A potência nominal dos aerogeradores está diretamente relacionada ao seu tamanho, que podem ser classificados em: (a) pequeno, até 50 kW, (b) médio, de 50 a 1000 kW e (c) grande porte, acima de 1MW de potência (WENZEL, 2007).

Um passo importante para efetuar implantações de aerogeradores para a geração de energia elétrica, em qualquer região, é a realização de uma análise detalhada das solicitações a que a estrutura será exposta. Isso é necessário, pois os aerogeradores são expostos diretamente ao ambiente e sua

variação de comportamento (PRACIANO; PARENTE, 2013). Estruturas deste tipo passam por carregamentos variáveis, que abordam tensões que variam com o tempo (NORTON, 2013). Frequentemente, os lapsos causados por estas cargas são gerados por tensões aplicadas de forma repetitiva, que possuem níveis bem inferiores às máximas admissíveis pelos materiais. Tais lapsos recebem o nome de falha por fadiga, que é responsável por grande parte das falhas individuais que ocorrem nos metais (CALLISTER, 2002).

Diferentes métodos podem ser utilizados para avaliar-se os carregamentos de fadiga em aerogeradores. Os métodos podem ser analíticos como, por exemplo, Goodman Modificado, Gerber e ASME-elíptica, empíricos ou, até mesmo, uma mistura dos dois (NORTON, 2013).

Ao considerar-se os aspectos relatados acima, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento da torre CGS3 de um aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte, quando exposta as solicitações devido à variação do vento em uma região genérica do sudoeste do Paraná - Brasil. A análise em questão ocorreu através de uma simulação pelo Método dos Elementos Finitos, realizada a partir do software Ansys, sob condições de carregamento determinadas a partir da ABNT NBR 6123:1988, onde os pontos críticos da torre foram avaliados através do critério de falha por fadiga de Goodman Modificado. A torre CGS3 aplicada para aerogeradores de pequeno porte será tida como foco de estudo por apresentar grande utilização em países da Europa, por suportar as solicitações feitas por aerogeradores de três pás e por disponibilizar um nível de detalhamento de informações muito grande (POLÍCIA, 2015).

Com o estudo da mecânica da fadiga relacionada às torres dos aerogeradores de eixos horizontais, é possível determinar a vida útil de seus elementos. Isso possibilita, determinar com maior acurácia quando será necessário realizar manutenções de seus componentes, visto que tais componentes podem ser dependentes das tensões cíclicas sofridas pela torre. Assim, com tais dados, possibilita-se realizar um melhor controle de gastos relacionados à manutenção, gerando um maior incentivo ao investimento neste meio de geração de energia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do trabalho proposto, foram utilizados dois softwares: (a) o SolidWorks, aplicado na modelagem da estrutura da torre eólica e (b) o Ansys para a análise do sólido utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Além dos softwares citados, duas normas foram utilizadas, sendo a ABNT NBR 6123:1988 e o Eurocode 3, parte 3-1, que se fazem necessárias para a obtenção do carregamento externo sobre a torre e a estimativa do número de ciclos à que a torre estará sujeita ao longo de determinado período, respectivamente. O fluxograma da Figura 1 mostra de forma mais clara as etapas para a análise do trabalho em questão.

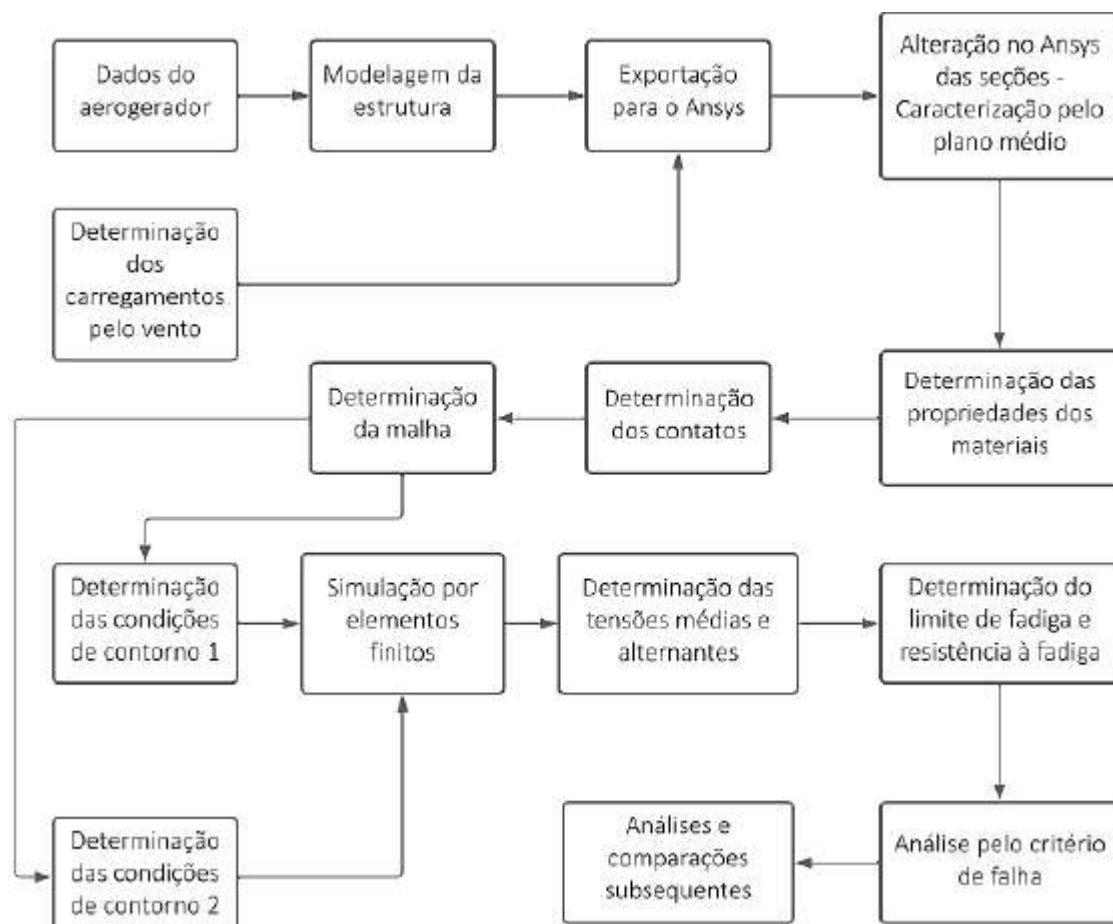


FIGURA 1. Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho. Fonte: Autores (2021).

2.1 MODELAGEM DO SÓLIDO

A modelagem da torre, principal foco de estudo, bem como do nacelle, cauda, rotor e pás foi realizada através do software CAD Solidworks 2015. Tais componentes tiveram como base as turbinas eólicas de eixo horizontal utilizadas por Polícia (2015). As dimensões utilizadas pelo autor foram baseadas em medições realizadas diretamente nos componentes. A torre em estudo é um modelo da classe CGS3 e um aerogerador Einar 70, com capacidade de aproximadamente 70 kW/h. A torre é uma estrutura metálica construída em aço estrutural S275JR pela empresa Metalgalva. Tal estrutura possui um comprimento total de 20 m dividida em quatro seções com dimensões variantes (Tabela 1). A conexão

entre seções é realizada pela ação do peso e atrito gerado no seu encaixe. A torre é fixa ao solo através de uma fundação com oito chumbadores de 32 mm de diâmetro fixados a um flange presente em sua base com 30 mm de espessura e um diâmetro externo e interno de 880 mm e 626 mm, respectivamente. Além dos componentes citados, a torre ainda apresenta oito cutelos fixos ao flange e a primeira seção da torre para garantir uma maior resistência na região inferior (POLÍCIA, 2015).

A Tabela 1 apresenta as principais dimensões relacionadas às quatro seções da torre, onde a primeira seção é acoplada ao solo e possui um comprimento (H) de 4050 mm, sendo 870 mm (h_e) acoplados a seção seguinte, esta ainda apresenta um diâmetro externo inferior ($\phi_{e.i}$) de 650 mm e superior ($\phi_{e.s}$) de 548 mm com uma espessura (t) de 4 mm. Ao serem acopladas todas as seções, esta apresentará um comprimento total de 20000 mm.

TABELA 1. Dimensões de cada segmento da torre de classe CGS3.

Partes/Medidas	H (mm)	h_e (mm)	$\phi_{e.s}$ (mm)	$\phi_{e.i}$ (mm)	t (mm)
1ª	4050	870	548	650	4
2ª	6000	690	428	580	4
3ª	6000	490	304	456	4
4ª	6000	-	175	327	4

Fonte: Adaptado de Polícia (2015).

Segundo Polícia (2015), é possível realizar uma simplificação quanto à modelagem do nacele e da cauda presente no aerogerador através de cilindros. Para tal simplificação, o autor fez uso das massas específicas reais de tais componentes, determinando através destas os diâmetros equivalentes para cada cilindro.

O modelo final desenvolvido da torre e os demais componentes superiores é apresentado na Figura 2.



FIGURA 2. Dimensões das pás e rotor do aerogerador Einar 70. Fonte: Autores (2021).

2.2 ESFORÇOS

No presente trabalho foi considerada apenas a ação do vento sobre a estrutura, sem levar em consideração os fenômenos sísmicos pouco incidentes no Brasil. O carregamento é composto por duas fontes principais (i) a ação do vento que age de forma distribuída e perpendicularmente ao plano central da torre, gerando um efeito de flexão e de cisalhamento, e (ii) a ação do próprio peso dos componentes, solicitando axialmente a torre (PRACIANO; PARENTE, 2013).

No Brasil, a regulamentação de normas adere a ABNT NBR 6123:1988 para a determinação das forças causadas em edificações pela ação do vento. Dentre os dois modelos de cálculos utilizados na norma apresentada, o modelo contínuo simplificado foi adotado por apresentar dados mais conservadores.

A partir da velocidade base (V_0) em metros por segundo da região sudoeste do Paraná e dos fatores topográfico (S_1) e estatístico (S_3), é possível determinar a velocidade média de projeto (\bar{V}_p) como mostra a Equação 1.

$$\bar{V}_p = 0,69 \cdot V_0 \cdot S_1 \cdot S_3 \quad (1)$$

Velocidade média de projeto serve como base para o cálculo da pressão dinâmica média exercida na estrutura em N/m^2 , dada pela Equação 2. (\bar{q}_o)

$$\bar{q}_o = 0,613 \cdot \bar{V}_p^2 \quad (2)$$

Para a determinação da distribuição de pressão dinâmica (q) em N/m^2 ao longo da altura da torre (z) em metros, foram consideradas duas parcelas da resposta (Equação 3). A primeira representa a resposta média e a segunda a amplitude máxima da resposta flutuante, dada pela Equação 3.

$$q(z) = \bar{q}_o \cdot b^2 \cdot \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \right) \cdot \xi \right] \quad (3)$$

onde, b e p são constantes dependentes da rugosidade do terreno e γ do tipo de estrutura, z_r é a altura de referência em metros, onde foram efetuadas as medições da velocidade do vento, h a altura total a partir do solo da estrutura também dada em metros e ξ o coeficiente de amplificação mecânica.

As variáveis citadas até o momento foram obtidas levando em consideração os valores catalogados na norma NBR 1988:6123, onde as características da região adotada para a análise do aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte foram de um típico ambiente urbano encontrado nas cidades do sul do Brasil. Tais características foram de um terreno plano ou pouco acidentado e com uma rugosidade equivalente a uma região industrial ou urbana. Através de tais variáveis e das Equações 1 a 4 a distribuição de carga resultante ao longo da altura total da torre pôde ser obtida e é apresentada na Figura 3.

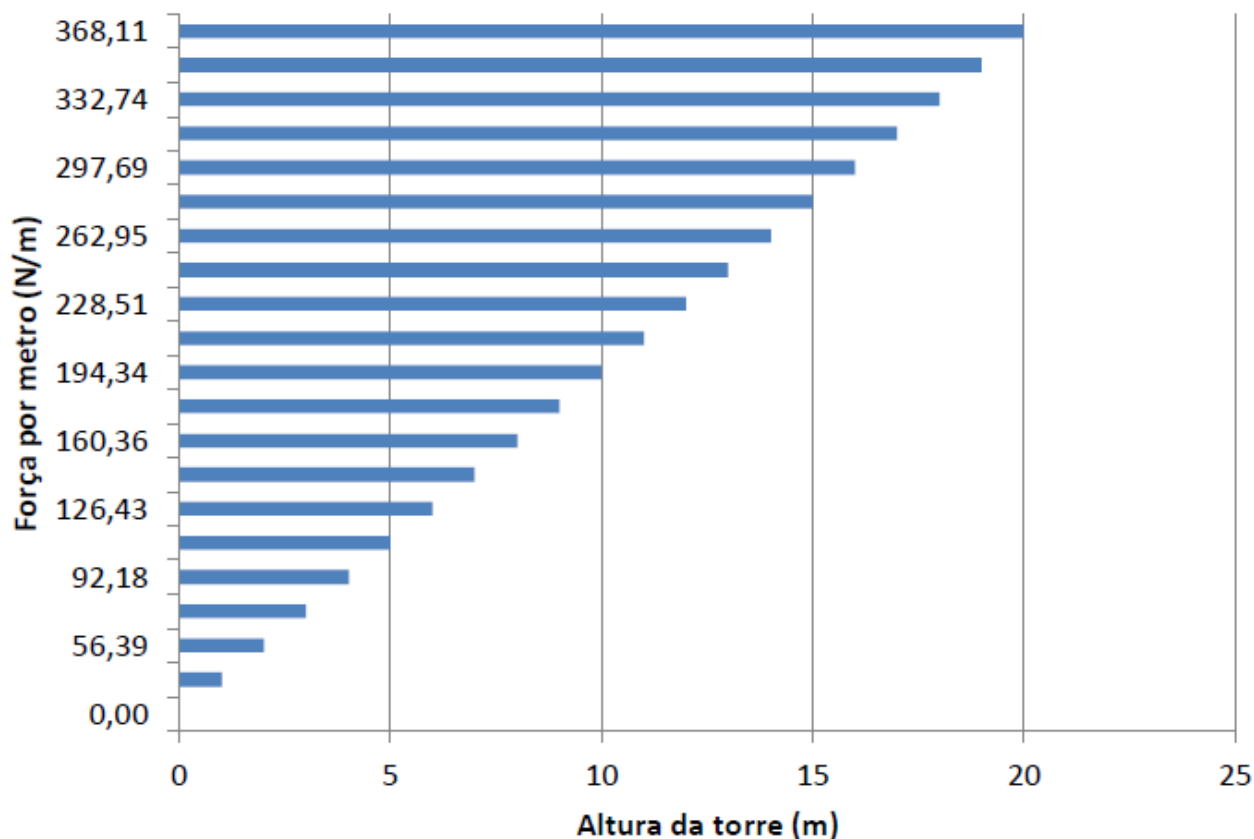


FIGURA 3. Variação da carga com a altitude da torre. Fonte: Autores (2021).

A carga gerada pelo vento sobre as pás foi considerada constante e calculada para a mesma velocidade média de projeto encontrada para a torre. Os pesos relacionados ao nacele, cauda, pás e rotor foram estabelecidos a partir do estudo de Polícia (2015). A força de arraste é obtida através da área total das pás, de um coeficiente de arrasto igual a 2, conforme a norma EN 61400-2 recomenda para ângulos de ataque diferentes de zero e da mesma velocidade média utilizada para a determinação do carregamento. Os valores de forças que atuam sobre a torre devido à presença dos componentes superiores do aerogerador podem ser visualizados na Tabela 2.

TABELA 2. Carregamentos dos componentes do aerogerador.

Carregamento	Valor (N)
Força de arraste nas pás	295,81
Força peso das pás e rotor	272,43
Força peso do nacele	1065,85
Força peso da cauda	488,15
Força peso total das seções	5192

Fonte: Autores (2021).

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para se obter a distribuição de tensões nos componentes da torre, utilizou-se o software Ansys Workbench 18.2. Este realizou a simulação numérica do aerogerador (Figura 2), através do Método dos Elementos Finitos. Algumas informações de pré-processamento são fundamentais para que a simulação reproduza as condições reais de exposição da estrutura como, por exemplo, a designação da malha, as condições de contorno aplicadas e as propriedades do material de cada região da estrutura.

A malha gerada para simulação através do Método dos Elementos Finitos é constituída por elementos de casca, hexaédricos e tetraédricos lineares (Tabela 3). A Figura 4 apresenta a malha desenvolvida para os cutelos, flange da base e para a primeira seção da torre.

TABELA 3. Estatísticas relacionadas à malha.

Componentes	Tipo de elemento	Tamanho máximo dos elementos (mm)	Número de elementos	Número de nós
Cutelos	Hexaédricos	5	7.566	40.556
Flange da base	Hexaédricos	10	11.516	58.689
Seções da torre	Casca	12	202.734	204.431
Suporte, nacele e cauda	Hexaédricos	15	33.799	129.348
Pás e rotor	Tetraédricos	15	65.034	119.934
Total			320.649	552.958

Fonte: Autores (2021).

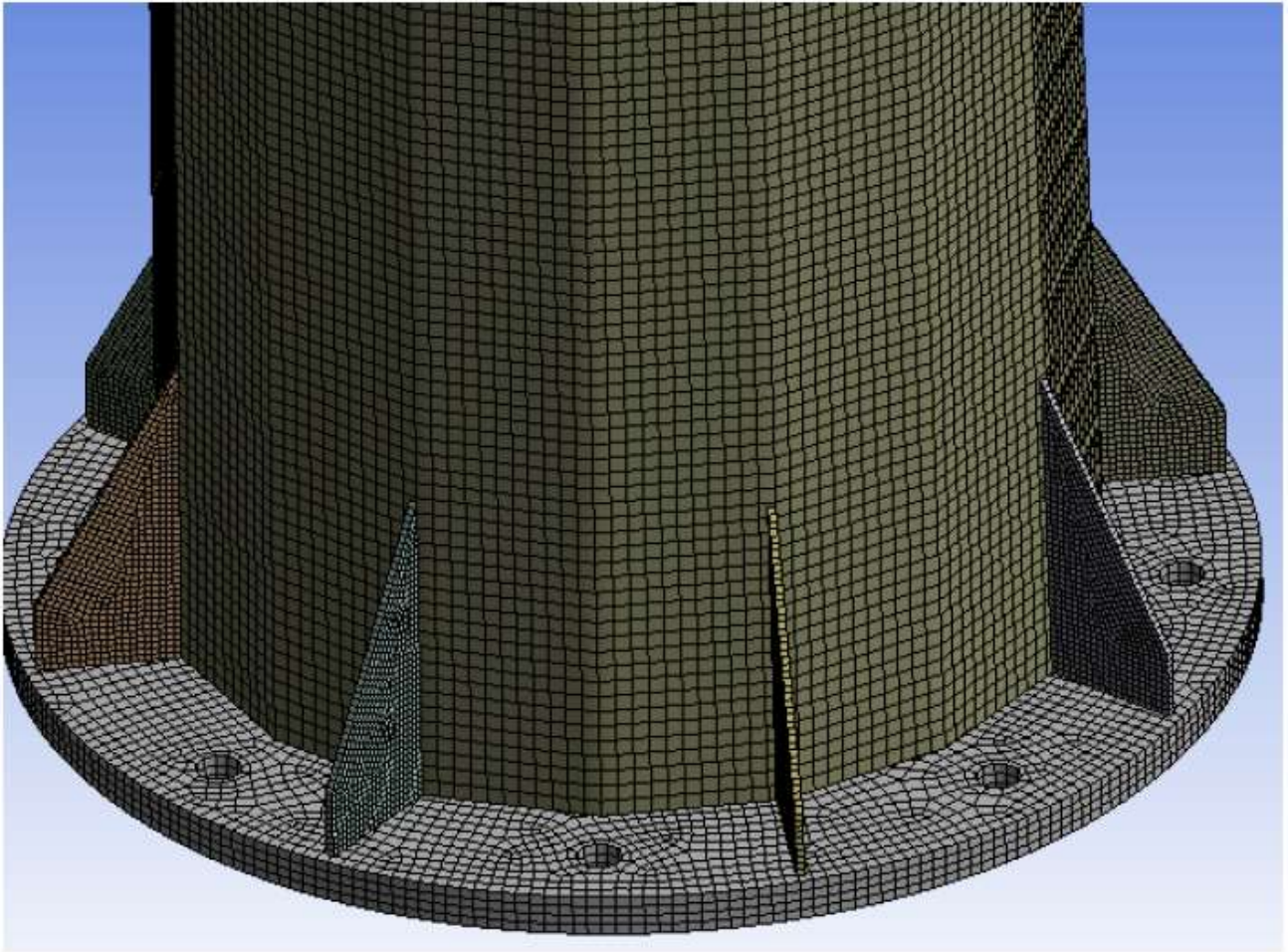


FIGURA 4. Malha gerada para cutelos, flange da base e primeira seção da torre. Fonte: Autores (2021).

O flange da base é fixo através de chumbadores presentes na fundação. Portanto, para simular tal fixação foi utilizada a ferramenta *cylindrical support* sobre a região cilíndrica do flange onde os chumbadores seriam acoplados. Assim, a movimentação nos três eixos principais x , y e z não serão permitidas.

Duas simulações para a determinação da tensão equivalente de von Mises foram realizadas sob duas diferentes condições de carregamento, onde uma é caracterizada pela presença do carregamento ao longo do vento devido a ação do vento e das forças pesos desenvolvidas pelos componentes, enquanto a outra considera apenas a ação dos pesos dos componentes. A primeira condição tem o intuito de determinar a tensão equivalente de von Mises máxima e a segunda condição a tensão mínima nos pontos críticos da estrutura.

As propriedades dos materiais a serem utilizados são expostas na Tabela 4. Vale salientar que o objetivo é analisar a torre metálica e não os componentes superiores, portanto, o que torna-se importante nos componentes superiores é apenas a ação que estes têm sobre a torre.

TABELA 4. Propriedades dos materiais.

Especificação	Densidade (kg/m ³)	Tensão de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Aço S275JR	7850	275	485	210000
Fibra de vidro	1850	-	284,79	X-35000; Y-9000; Z-9000
Fibra de vidro - nacele	3074,14	-	284,79	X-35000; Y-9000; Z-9000
Fibra de vidro - cauda	1767,96	-	284,79	X-35000; Y-9000; Z-9000

Fonte: Adaptado de European Committee for Standardization (2004) e Kennedy et al. (2016).

2.4 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE FADIGA

De acordo com Norton (2013), elementos expostos a tensões variáveis podem ser analisados a partir de suas tensões máximas (σ_{max}) e mínimas (σ_{min}), sem que a variação da forma de onda em que as tensões são aplicadas interfira. Essas tensões possibilitam calcular as tensões médias (σ_m) e alternadas (σ_a) em Pascals.

Para garantir a segurança estrutural da torre metálica, o critério de avaliação de falha por fadiga utilizado foi o de Goodman modificado (Equação 4) e de Langer para o escoamento (Equação 5). Estes devem atingir um valor superior a uma unidade para garantir uma vida mínima de vinte anos sem falha e são definidos como

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (4)$$

E

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (5)$$

Sendo S_{ut} o limite de resistência à tração do material da torre e S_f a resistência à fadiga obtida, dadas em Pascals para um número de ciclos N até a falha, obtida pela Equação 6.

$$S_f = a \cdot N^b \quad (6)$$

Os parâmetros a e b são constantes que dependem do material utilizado e das características físicas do componente mecânico analisado. Segundo o *European Committee for Standardization* (2006), estruturas de aço, como, por exemplo, torres e mastros podem ter uma aproximação do número de ciclos a que estão expostos para um determinado período (T) em anos devido à ação do vento pela Equação 7.

$$N = \frac{10^5 \cdot T}{50} \quad (7)$$

Por fim, o limite de fadiga corrigido indica o valor limite de tensão para uma vida infinita. Este é obtido através de valores de ensaios e fatores modificadores, definido pela Equação 7.

$$S_e = C_{sup} \cdot C_{tamanho} \cdot C_{carreg} \cdot C_{temp} \cdot C_{conf} \cdot C_{fatores} \cdot S_e' \quad (8)$$

Budynas e Nisbett (2016) apresentam o fator de superfície (C_{sup}), tamanho, carregamento (C_{carreg}), temperatura (C_{temp}), confiabilidade (C_{conf}) e efeitos diversos ($C_{fatores}$) como modificadores do limite de fadiga (S_e'), para que se obtenha uma melhor aproximação dos ensaios para com a realidade, onde o limite de fadiga é dado em Pascal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a simulação levando em consideração a condição de carregamento máxima, foram expostos três pontos principais providos com os maiores valores de tensões equivalentes de von Mises, sendo estes: (a) a área de contato a sotavento entre o flange da base e a primeira seção da torre apresentando uma tensão equivalente de von Mises de 62,05 MPa, (b) na região de contato a sotavento e barlavento entre os cutelos e a primeira seção da torre com uma tensão equivalente de 53,12 MPa (Figura 5) e (c) as arestas laterais das conexões feitas entre as seções, que apresentaram tensões de aproximadamente 49 MPa (Figura 6).

As regiões a e b citadas acima entre a primeira seção da torre, o flange e os cutelos adquiriram tais gradientes elevados, por apresentarem um local de contato entre duas geometrias distintas, caracterizado por um canto vivo que favorece muito a concentração de tensão local. O ponto c apresenta-se constantemente em fricção pela fixação da torre por *slip joint*, tendendo assim a desenvolver maiores tensões.

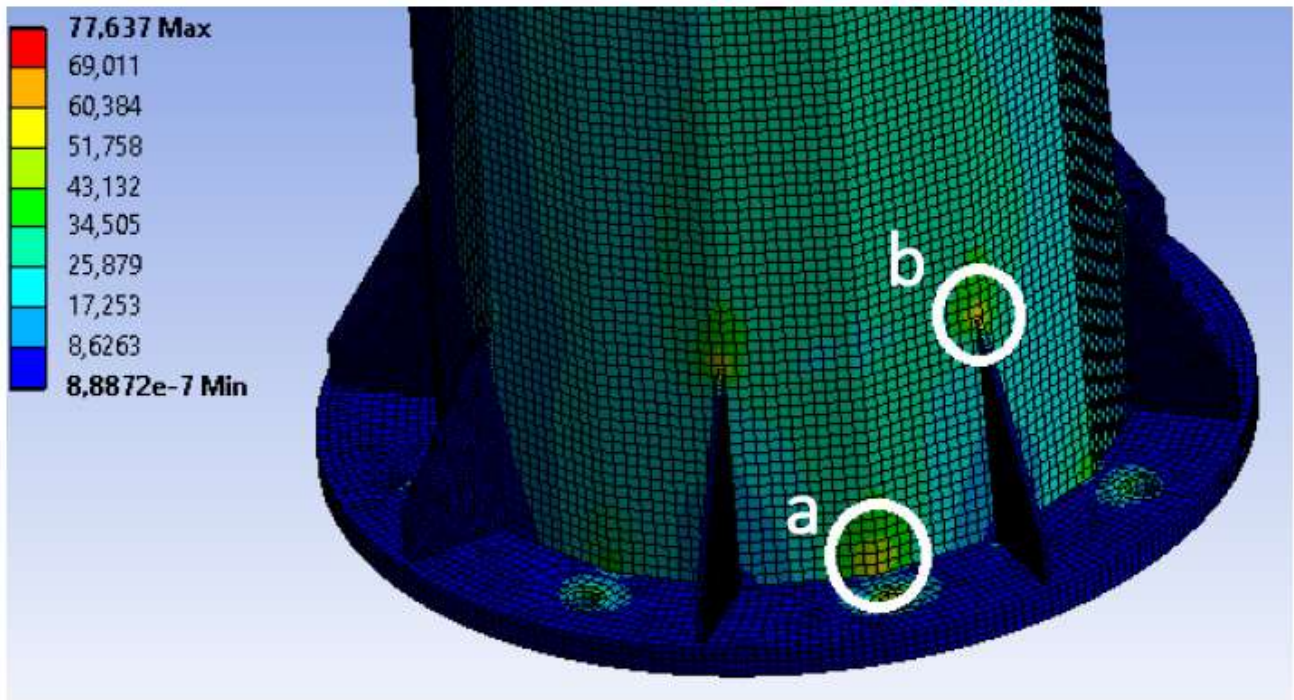


FIGURA 5. Tensões equivalentes de von Mises (MPa) nos pontos a e b. Fonte: Autores (2021).

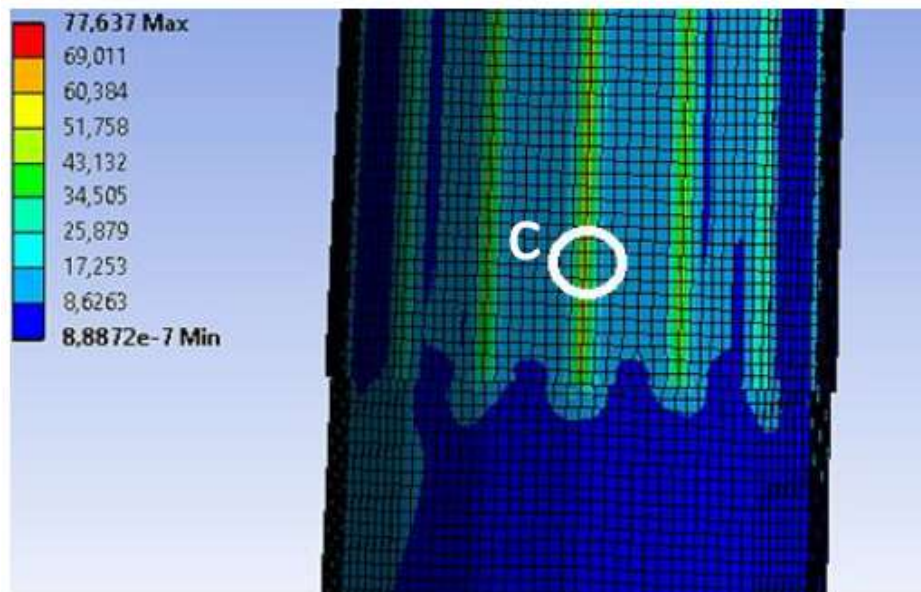


FIGURA 6. Tensões equivalentes de von Mises (MPa) no ponto c. Fonte: Autores (2021).

A Tabela 5 apresenta as tensões atuantes nos pontos a, b e c. As tensões máximas foram determinadas a partir das forças da ação do vento e peso. As mínimas foram obtidas utilizando apenas as forças peso.

TABELA 5. Tensões médias e alternantes nos pontos críticos

Ponto	Tensão máxima (MPa)	Tensão mínima (MPa)	Tensão média (MPa)	Tensão alternante (MPa)
a	62,05	3,41	32,73	29,32
b	53,15	2,89	28,01	25,12
c	49	0,73	24,87	24,14

Fonte: Autores (2021).

A tensão limite de fadiga corrigida para os três principais pontos foi determinada através dos fatores apresentados na Equação 8, como pode ser visto na Tabela 6.

TABELA 6. Tensão limite de fadiga corrigida e seus fatores modificadores

Ponto	Fator de superfície	Fator de tamanho	Fator de carga	Fator de temperatura	Fator de confiabilidade	Limite de fadiga (MPa)	Limite de fadiga corrigido (MPa)
a	0,68	0,638	1,0	1,0	0,814	242,5	85,64
b	0,68	0,638	1,0	1,0	0,814	242,5	85,64
c	0,68	0,675	1,0	1,0	0,814	242,5	90,60

Fonte: Autores (2021).

Depois de obtidos os dados relacionados à resistência do material, a fração da resistência à tração a 10^3 ciclos, bem como as constantes do material a e b foram estabelecidos e apresentados na Tabela 7.

TABELA 7. Constantes do material para os principais pontos da torre CGS3

Ponto	Constante do material a	Constante do material b	Fração de S_{ut} a 10^3 ciclos
a	$2,225 \times 10^9$	-0,236	0,9
b	$2,225 \times 10^9$	-0,236	0,9
c	$2,103 \times 10^9$	-0,228	0,9

Fonte: Autores (2021).

Para uma vida útil mínima de 20 anos, como recomendado pela IEC, através da norma IEC 61400, parte 1, a torre de classe CGS3 terá de suportar aproximadamente 4×10^4 ciclos, como determinado pela Equação 7. A Tabela 8 apresenta a resistência à fadiga, para este número de ciclos, bem como o coeficiente de segurança de Goodman Modificado para fadiga e Langer para o escoamento.

TABELA 8. Resistência à fadiga e coeficientes de segurança de fadiga e escoamento para os principais pontos da torre CGS3

Ponto	Resistência à fadiga " S_f " (MPa)	Goodman Modificado " n_f "	Langer escoamento " n_y "
a	182,92	4,39	4,43
b	182,92	5,13	5,18
c	188,51	5,58	5,61

Fonte: Autores (2021).

Analisando os valores apresentados na Tabela 8, nota-se que os valores dos coeficientes de segurança de Goodman Modificado foram superiores a uma unidade. Ou seja, a torre apresentará uma vida em fadiga superior a 20 anos quando esta é submetida às condições presentes em um típico ambiente sulista brasileiro. As regiões mais críticas da torre suportam números de ciclos superiores aos solicitados ao longo de 20 anos de trabalho, sendo o flange da base, o local mais solicitado, apresentando valores de resistência à fadiga mais próximos ao da tensão alternante gerada. Visto que a estrutura resiste sob fadiga a 20 anos de trabalho, esta pode ainda ser avaliada quanto à vida infinita. Nota-se, através da Tabela 9, que os valores dos coeficientes de segurança de Goodman Modificado para vida infinita calculados de forma analítica, apresentam valores também superiores a uma unidade, caracterizando-a para a estrutura sob as condições analisadas.

TABELA 9. Coeficiente de segurança para vida infinita

Ponto	Goodman Modificado “n _f ”
a	2,44
b	2,85
c	3,15

Fonte: Autores (2021).

Tendo em vista o carregamento aplicado sobre a estrutura, foi verificado que este se encontra diretamente relacionado à velocidade do vento e a seu comportamento. Portanto, ao realizar-se alterações sobre o ambiente e nível de segurança que a torre deve atender em relação a sua localização e tempo de vida útil, a velocidade média de projeto do vento é alterada. Isso provoca uma resposta dinâmica maior sobre a estrutura. Conseqüentemente, as tensões médias e alterantes, geradas pelo carregamento, alteram-se. Isso pode exceder os valores obtidos pela curva de Goodman Modificado e Langer.

Com a possibilidade de obtenção de vida infinita em fadiga pela torre, os coeficientes de segurança foram reavaliados. As condições da simulação foram mantidas iguais a simulação inicial. Notou-se que os pontos com menores coeficientes de segurança identificados foram as regiões de concentrações de tensões já expostas, onde as seções mais críticas apresentam coeficientes de 2,42 e 2,8, sendo estes nos pontos a e b, respectivamente (Figura 8). Esse valor é muito próximo ao calculado e exposto na Tabela 9. Portanto, os dados encontrados analiticamente se mostram semelhantes aos encontrados por simulação numérica, onde os dois demonstraram que a estrutura não apresentará falha por fadiga ao ser implantada no sul do Brasil. Além disso, averiguou-se também que esta apresenta vida infinita para uma condição de aplicação em área urbana industrial.

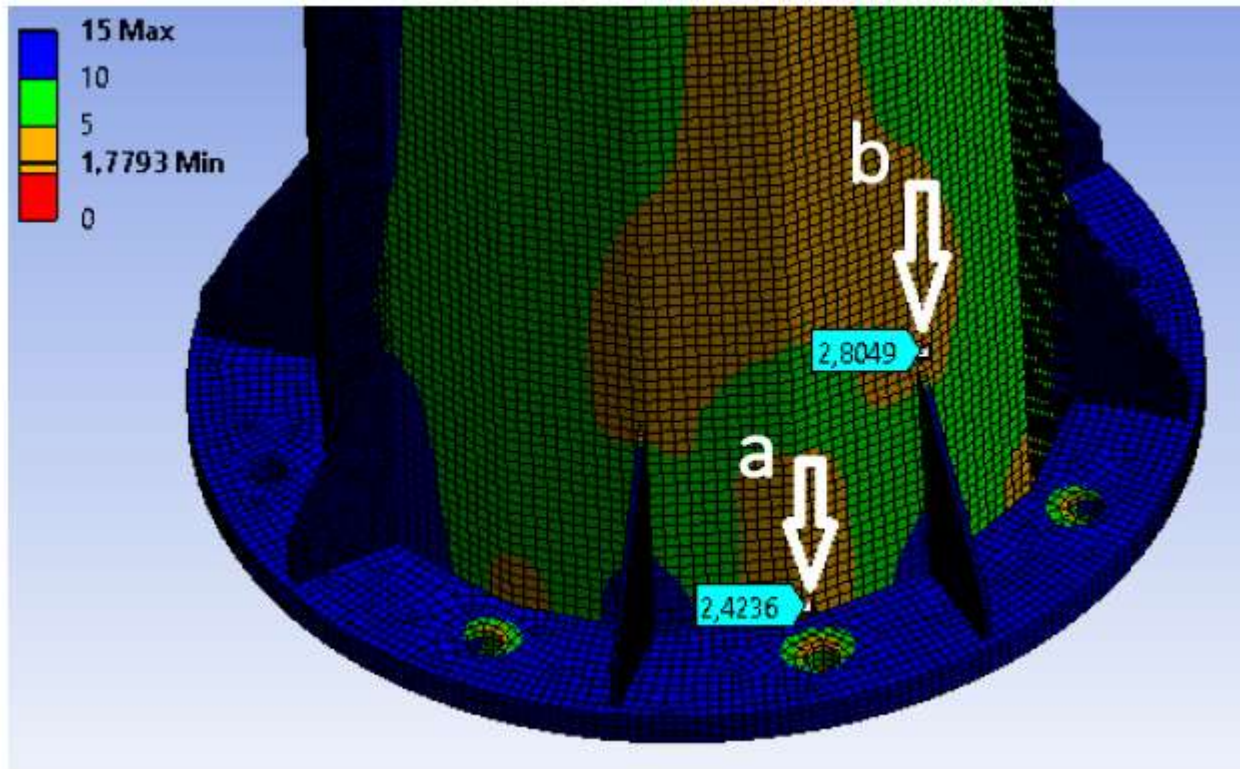


FIGURA 8. Coeficiente de segurança de Goodman Modificado para uma vida infinita encontrado via Ansys. Fonte: Autores (2021).

Diferentes características são notadas, ao longo do território brasileiro, relacionadas ao relevo e outras condições naturais que tornam cada região única. Pensando nisso e na replicação do trabalho para diferentes regiões do país, outra análise foi realizada para novamente verificar a aplicabilidade da torre CGS3 para uma implantação próxima a residências rurais. Nesse sentido, o ambiente apresenta baixa perda de carga no escoamento de ar e elevado grau de responsabilidade, ou seja, que pode vir a gerar graves danos em sua localidade e por a vida de pessoas em risco caso falhe.

O carregamento distribuído ao longo da torre para as novas condições é apresentado na Figura 7. Ao comparar os valores encontrados nas duas regiões distintas (Figura 3 e 7), percebe-se que as forças ao longo da torre desenvolvidas no segundo ambiente obtiveram valores aproximadamente 80% maiores que as forças encontradas para as regiões urbanas e industriais adotadas inicialmente. Tal variação do carregamento faz com que a tensão equivalente de von Mises na região mais crítica seja de 120,04 MPa. Esse valor conduz a obtenção de um coeficiente de segurança por Goodman Modificado e Lange de 2,24 e 2,29, respectivamente, para uma vida útil mínima de 20 anos.

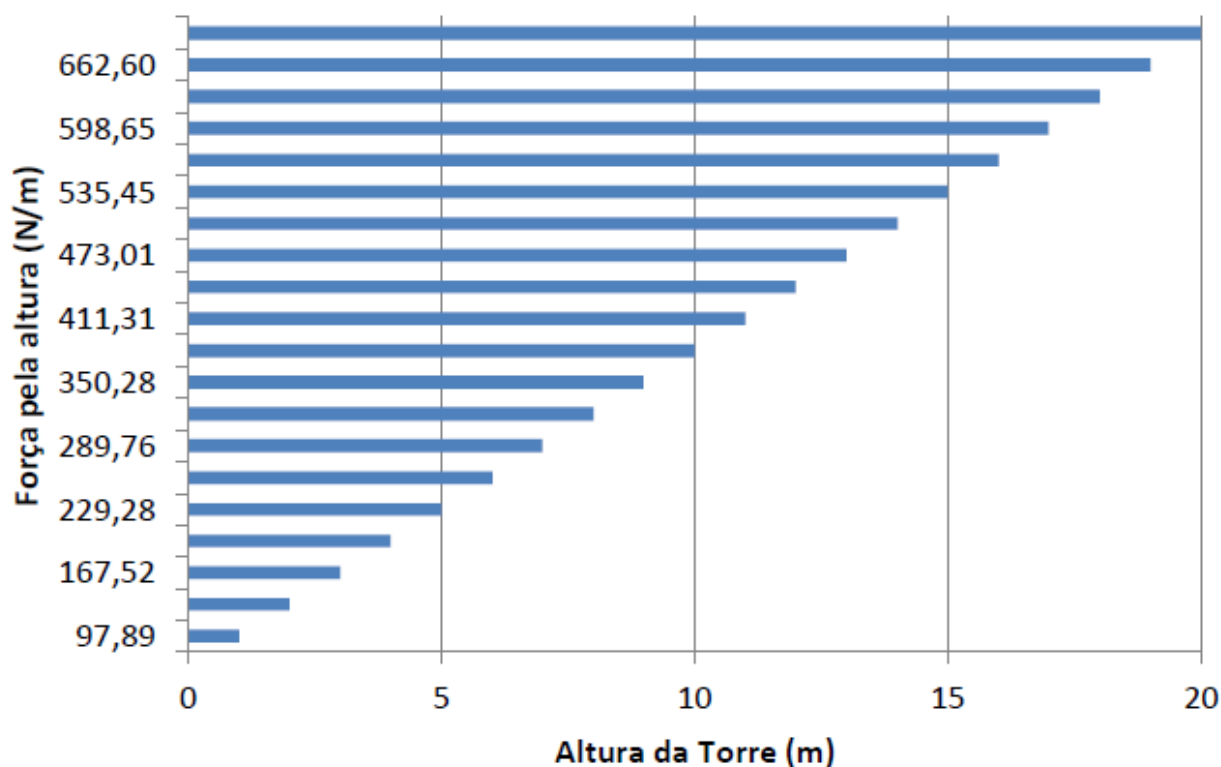


FIGURA 7. Carregamento distribuído para uma torre aplicada próxima a residências rurais. Fonte: Autores (2021).

Nota-se através da comparação de dados que mesmo sob condições de baixa perda de carga e elevada responsabilidade a torre de modelo CGS3 utilizada em aerogeradores de eixos horizontais de pequeno porte, mostra-se apta a ser aplicada na região sul do país.

4. CONCLUSÕES

A torre CGS3 utilizada para aerogeradores de eixos horizontais de pequeno porte, quando exposta as condições apresentadas em ambiente urbano e industrial na região sul do Brasil, apresenta três pontos críticos ou pontos com maiores gradientes de tensões na estrutura, sendo estes: (a) a conexão entre a primeira seção da torre e o flange da base, (b) a área de contato entre os cutelos e a primeira seção da torre e (c) as arestas laterais das regiões de contato entre as seções da torre.

Os níveis de tensões médias e alternantes encontradas para os pontos críticos não excederam sua resistência ao escoamento de acordo com o critério de Langer e sua resistência à fadiga para uma vida útil mínima de 20 anos, caracterizando assim uma estrutura livre de falhas por fadiga.

Mesmo com níveis de tensões médias e alternantes baixas, os pontos críticos devem receber cuidado especial. Isso é necessário, pois todos estão sujeitos a ações como corrosão, o que influencia as

propriedades mecânicas do material. Além disso, dois dos três pontos apresentam solda o que pode gerar pontos de nucleação de trincas.

Através da comparação entre os valores de carregamentos apresentados na aplicação do aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte em duas regiões distintas no sul do Brasil, a aplicação da torre CGS3 de acordo com especificações da norma ABNT NBR 6123:1988 se mostra apta a ocorrer em todas as regiões, por apresentar mesmo sob condições de baixa perda de carga e elevada responsabilidade, valores aceitáveis dos coeficientes de segurança. Porém, quando aplicada em regiões com uma velocidade média do vento elevada e de alta responsabilidade, deve-se existir uma preocupação ainda maior sobre as regiões críticas, já que a estrutura apresentou valores de carregamentos até 80 % maiores sob tais condições.

Após a comparação realizada entre os resultados analíticos e numéricos, notou-se grande semelhança nos resultados encontrados, onde estes também indicam uma aplicabilidade da estrutura na região sul com vida infinita.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123 - Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.

BRETSCHNEIDER, M. R. Projeto e simulação de pás para aerogerador horizontal de pequeno porte. Dissertação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais – Universidade Feevale, 92 f., 2018.

CALLISTER, W.D.JR. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 1a.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CASTRO, R. M. G. Energias renováveis e produção descentralizada: introdução à energia eólica. Universidade Técnica de Lisboa. DEEC, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz energética e elétrica. EPE, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acessado em: 16 abril 2020.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN1993-3-1. Design of steel structures part 3-1: towers, masts and chimneys, CEN, 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC61400-1. Wind energy generation systems part 1: design requirements, IEC, 2019.

MAIOLINO, P. Análise dinâmica de turbina eólica offshore do tipo monocoluna. Dissertação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MORELLI, F. S. Panorama geral da energia eólica no Brasil. Universidade de São Paulo, 2012.

MÜLLER, M. N. Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4a. ed. Bookman, Porto Alegre, 2013.

PESTANA, D. A. C. Sistemas estruturais para torres eólicas. Dissertação em Engenharia Civil - Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Portugal, 2016.

POLÍCIA, A. R. Estudo do efeito da fadiga em torres com aerogeradores. Dissertação em Engenharia Civil - Universidade do Porto, 2015.

PRACIANO, J. S. C.; PARENTE, E. Otimização Estrutural de Torres Metálicas para Aerogeradores. Proceedings of the 34th Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Goiás, Brazil, 2013.

RIVERA, J. S. T. Aerodinâmica do sistema torre: turbina eólica de eixo horizontal. Dissertação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

Capítulo 3



10.37423/220706276

UTILIZAÇÃO DE JOGO DIDÁTICO COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO DE APRENDIZAGEM NA DISCIPLINA DE MATÉRIAS-PRIMAS DE ORIGEM ANIMAL

Matheus Calixto Saraiva

Universidade Federal do Ceará

Carlos Alberto de Jesus Filho

Universidade Federal do Ceará

Gizele Almada Cruz

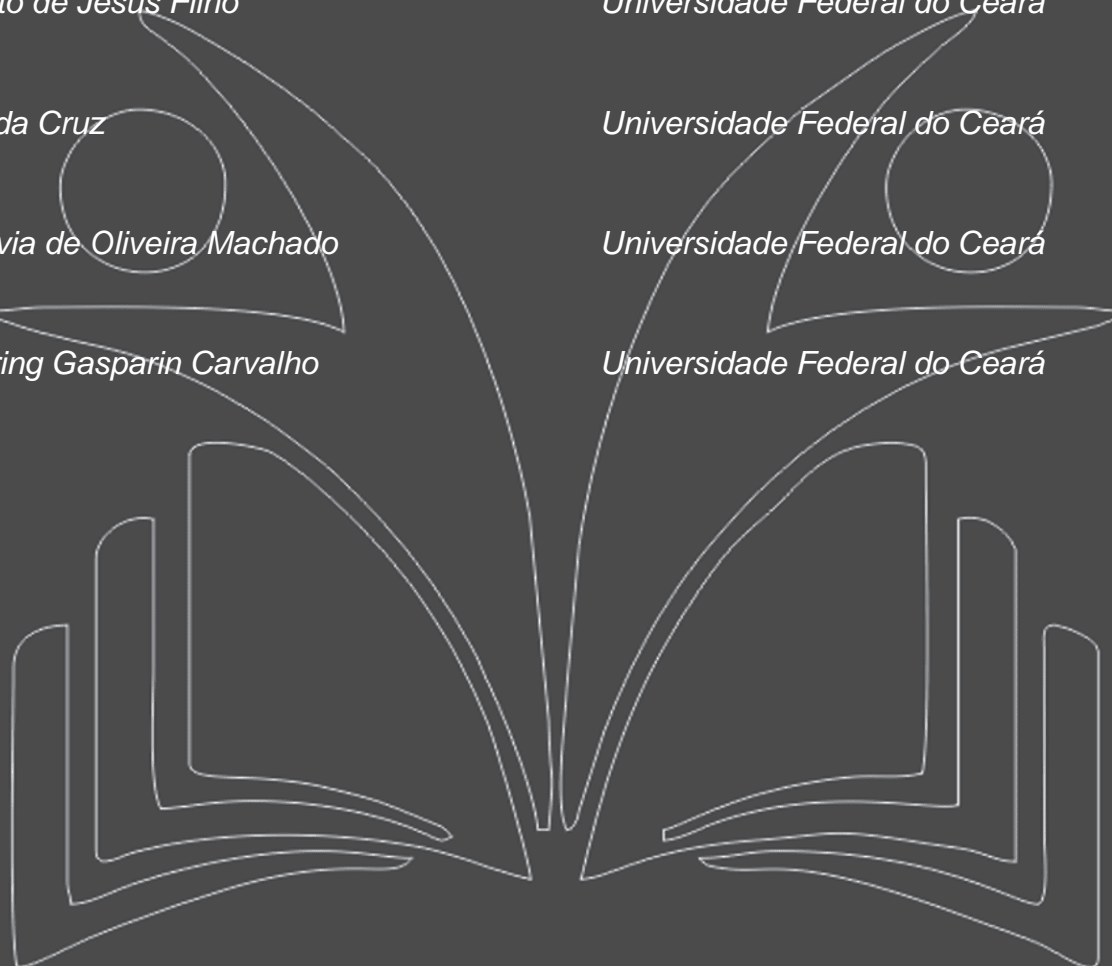
Universidade Federal do Ceará

Francisca Lívia de Oliveira Machado

Universidade Federal do Ceará

Juliane Döering Gasparin Carvalho

Universidade Federal do Ceará



Resumo: *A formação do Engenheiro de Alimentos engloba conhecimentos de várias áreas: ciência, tecnologia e engenharia. O estudo de matérias-primas básicas está incluído nos campos de estudo da formação do engenheiro. Novos métodos de ensino que auxiliam e dinamizam a aprendizagem são necessários para estimular o aluno durante a abordagem do conteúdo. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver um jogo lúdico para auxiliar na aprendizagem do conteúdo abordado na disciplina de Matérias-primas de Origem Animal (MPOA). O jogo MPOA's race foi aplicado para 41 alunos, o qual foi constituído de tabuleiro, dois dados e perguntas objetivas e discursivas sobre o assunto. Para avaliação da atividade lúdica foi elaborado um questionário on-line. De acordo com as respostas obtidas, 97 % dos alunos consideram o jogo uma forma de auxiliar na aprendizagem, assim como assimilar o conteúdo. Além disso, foram dadas sugestões para melhoria da atividade, como melhor organização, digitalização do jogo e abordar assuntos ligados a processos. Dessa forma, os jogos lúdicos, como o aplicado neste trabalho, são uma forma de melhorar a assimilação do conteúdo pelos discentes.*

Palavras-chave: *Ensino. Ludicidade. Tabuleiro.*

1 INTRODUÇÃO

O Engenheiro de Alimentos é um profissional que une conhecimentos das ciências, das tecnologias e da engenharia nos processos de fabricação, preservação, armazenamento, transporte e consumo dos produtos alimentícios. Esse profissional atua principalmente na indústria de alimentos sendo o principal responsável pela garantia da qualidade e segurança dos alimentos, além de desenvolver produtos e processar matérias-primas básicas como leite, frutas, hortaliças e cereais (UFC, 2019; ANCHIETA, 2018). Logo, aliar o conhecimento à ferramentas de ensino que ajudam o estudante de graduação a assimilar os vários conteúdos abordados se faz necessário para melhoria da aprendizagem.

Dentre as ferramentas que podem ser utilizadas para melhorar a aprendizagem do ensino, tem-se o jogo didático. Segundo Kishimoto (1994), o jogo é considerado um tipo de atividade que possui duas funções: a lúdica e a educativa. Elas devem estar em equilíbrio, pois se a função lúdica prevalecer, a atividade não passará de uma diversão e se a função educativa for predominante será considerado apenas um material didático. Desse modo, Covos (2018) afirma que o jogo didático deve ser uma atividade bem planejada e organizada, promovendo a aprendizagem e o desenvolvimento de habilidades e competências do discente. Ao jogar, os alunos, geralmente, se sentem mais seguros do que no ensino comum, porque o jogo é algo natural, divertido. Os jogos se caracterizam por dois elementos que apresentam o prazer e o esforço espontâneo, além de integrarem as várias dimensões do aluno como os aspectos cognitivos, afetivos e sociais da aprendizagem (VONDROVÁ e ŠILHÁNOVÁ, 2013). Assim sendo eles devem ser inseridos como impulsores nos trabalhos acadêmicos, de preferência, com auxílio de um mediador.

Os mediadores, geralmente, são o professor, o monitor e/ou estudante de pós-graduação que realiza estágio à Docência. Eles devem oferecer possibilidades na construção do conhecimento, respeitando as diversas singularidades. Essas atividades focam no desenvolvimento de competências, como a interlocução de saberes, a socialização e o desenvolvimento pessoal, social, e cognitivo (HOPPE e KROEFF, 2014). Quando se cria ou se adapta um jogo ao conteúdo acadêmico, ocorrerá o desenvolvimento de habilidades que envolvem o indivíduo em todos os aspectos: cognitivos, emocionais e relacionais (MELO, 2005). A competição é característica inerente aos jogos, no entanto ela não deve ser estimulada em atividades que focam o aprendizado.

Os jogos são indicados como um tipo de recurso didático educativo que podem ser utilizados em momentos distintos, como na apresentação de um conteúdo, ressaltando aspectos relevantes ao

assunto, como revisão ou síntese de conceitos importantes e avaliação de temas já desenvolvidos (CUNHA, 2004).

Nota-se que o perfil dos estudantes das universidades vem sofrendo mudanças. Há alguns anos, os universitários eram compostos por jovens que tinham por objetivo somente o estudo. Atualmente, os estudantes possuem diferentes faixas etárias e possuem pouco tempo livre para se dedicarem, portanto a sala de aula é o momento apropriado para discussões, o qual deve ser aproveitado (COVOS, 2018), sendo então necessário a utilização de metodologias de aprendizagem que contribuam para o melhor rendimento.

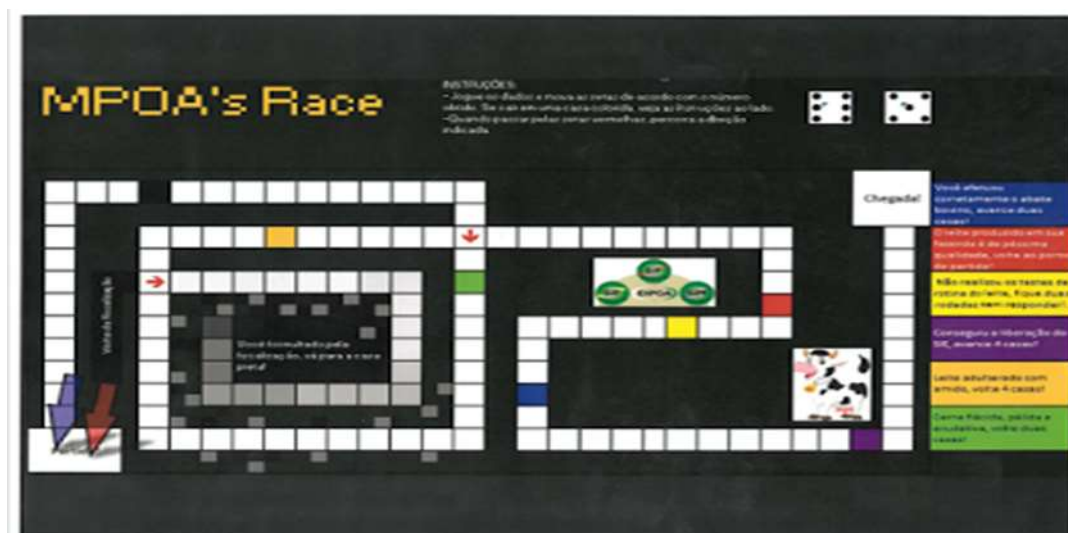
Dessa forma, optou-se por utilizar a ferramenta de jogo lúdico para facilitar o ensino e aprendizado dos estudantes universitários no curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará, durante a disciplina denominada Matérias-Primas de Origem Animal (MPOA), onde os alunos estudam desde a obtenção das matérias-primas (leite, carne, pescado, mel e ovos), os aspectos legais que regulam sua produção, as reações que ocorrem durante seu processamento e a sua destinação final.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficácia do jogo didático desenvolvido sobre o aprendizado dos discentes da disciplina de MPOA, como também, ampliar e revisar os conhecimentos adquiridos durante as aulas práticas e teóricas.

2 METODOLOGIA

O jogo “MPOA’s Race” (FIGURA 1) foi desenvolvido pelos monitores juntamente com a doutoranda em estágio à docência e a professora responsável pela disciplina de Matérias-Primas de Origem Animal. O material do jogo foi composto de tabuleiro, impresso em papel A3, dois dados, formulário de perguntas e respostas numeradas em sequência, abordando os conteúdos ministrados (aspectos legais sobre matérias-primas de origem animal, leite e o seu beneficiamento). A atividade lúdica foi realizada em turma composta por 41 alunos da graduação de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC). As 47 perguntas foram elaboradas de forma objetiva e discursiva, sendo revisadas. O objetivo do jogo era chegar ao final do caminho traçado, no qual à medida que se acertavam as perguntas, o somatório atingido nos dados era avançado em número de casas, até o ponto final.

Figura 1 – Tabuleiro utilizado para a aplicação do jogo didático no curso de Engenharia de Alimentos da UFC.



Fonte: Autores

A turma foi dividida em quatro grupos grandes, na qual cada um escolheu um pino de cor diferente para representá-lo. Em cada rodada, um integrante da equipe lançava os dados de forma a obter o número de casas para o deslocamento no tabuleiro, selecionava uma pergunta de 1 a 47, a qual era discutida pelo grupo, sendo a resposta emitida pelo componente que iniciou a jogada. Foi estipulado um tempo para a equipe responder a pergunta. A cada rodada, um estudante diferente deveria participar.

Figura 2 - Momento de interação entre professora e estudantes do curso de Engenharia de Alimentos da UFC.



Fonte: Autores

Ocorrendo o acerto, a equipe andava o número de casas obtidas de acordo com o lançamento dos dados. Havendo erro na resposta, a pergunta passava para a equipe seguinte, no sentido horário. Caso não ocorresse acerto, outra equipe tinha a chance de responder corretamente a pergunta. Após a pergunta passar por todos grupos, a resposta correta era discutida pela professora e alunos, explicando-a de forma clara e sucinta. A equipe que atingiu o ponto de chegada foi a vencedora.

Figura 3 - Interação entre estudantes da mesma equipe para discussão de resposta do jogo didático aplicado no curso de Engenharia de Alimentos da UFC.



Fonte: Autores

A fim de avaliar a utilização desse jogo como ferramenta de auxílio da aprendizagem na disciplina, foi elaborado um questionário online e enviado aos alunos pelo Sistema Integrado de Gestão de Atividades Acadêmicas (SIGAA) da UFC. Foram elaboradas cinco perguntas objetivas e uma pergunta subjetiva, sendo esta última, utilizada para saber quais as possíveis formas de aprimoramento dessa prática, na visão dos alunos. A análise estatística de frequência dos dados foi realizada.

Figura 4 - Explicação da resposta correta pela professora no jogo didático aplicado aos alunos do curso de Engenharia de Alimentos da UFC.

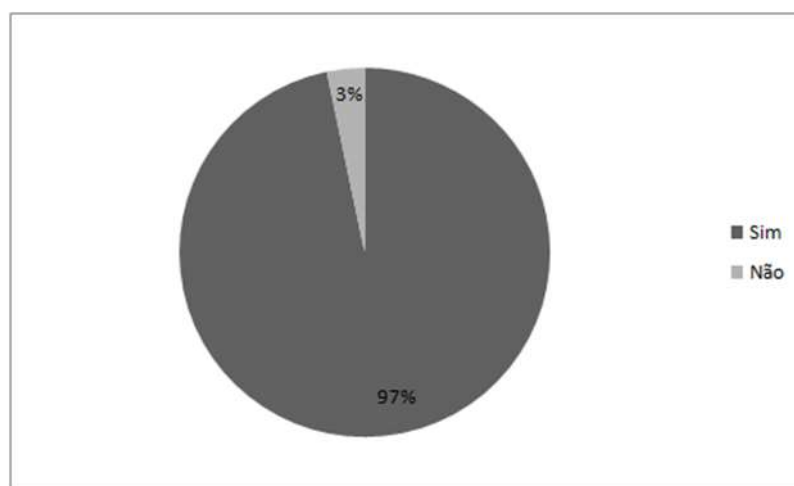


Fonte: Autores

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das 30 respostas obtidas pelo formulário disponibilizado para os discentes, todos afirmaram gostar de jogos. Destes, 97% (FIGURA 5) declararam que o jogo didático aplicado apresentou eficiência no auxílio da aprendizagem. Esse fato corrobora a ideia da necessidade de mudança na metodologia de ensino demonstrada por Covos (2018), buscando aumentar o interesse e o gosto dos alunos em aprender. Segundo Kyia (2014), os jogos e brincadeiras lúdicas ajudam o indivíduo a se socializar, elaborar conceitos, formular ideias, estabelecer relações lógicas e integrar percepções.

Figura 5 - Avaliação da eficiência da aplicação de jogos didáticos no curso de Engenharia de Alimentos da UFC



Fonte: Autores

De acordo com 97% dos discentes, o jogo ajudou na assimilação do conteúdo, mostrando que a atividade lúdica auxilia na fixação dos temas ministrados pelo professor durante as aulas tradicionais. Em estudo de Freitas Filho e Schröter, ao realizar um jogo didático para auxiliar no processo de aprendizagem de alunos Gestão da Tecnologia e Inovação, os autores notaram que o jogo conseguiu agradar os alunos, pois o resultado final foi uma melhor compreensão de todo o processo relacionado à gestão da inovação, aliando momento de descontração e aprendizagem.

Rau (2007), na busca por respostas sobre como tornar o ensino agradável, tanto para os alunos quanto para os professores, descobriu que o uso de jogos como de atividades lúdicas como recursos metodológicos, pode ser uma alternativa para melhorar o processo de ensino/aprendizagem.

O mesmo número de alunos (97%) indicou que tanto questões objetivas como subjetivas podem ser utilizadas para elaboração de propostas futuras de atividades lúdicas, pois eles consideraram que as

questões objetivas também auxiliam no aprendizado, principalmente, quando discutidas pelo mediador.

Entre as sugestões dadas para melhoria da atividade lúdica estão a organização das perguntas por dificuldade, a abordagem de assuntos referentes a problemas tecnológicos na indústria e a digitalização do jogo. As observações foram consideradas relevantes para o aperfeiçoamento do jogo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atividade lúdica em forma do jogo MPOA's race agradou os estudantes e é considerado eficiente no aprendizado e assimilação do conteúdo ministrado na disciplina de Matérias-primas de Origem Animal, podendo ser aplicado nos próximos semestres como ferramenta de ensino, seguindo o mesmo estilo, com questões objetivas e subjetivas, as quais devem ser discutidas. As sugestões dadas pelos discentes podem ser incorporadas para aperfeiçoamento da atividade.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará por fornecer sua infraestrutura multimídia e de salas climatizadas para realização dos jogos didáticos, assim como proporcionar aos seus alunos oportunidades de se tornarem melhores profissionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

O que faz um Engenheiro de Alimentos? Grupo Anchieta. Disponível em: <<https://www.anchieta.br/blog/o-que-faz-um-engenheiro-de-alimentos#:~:text=O%20papel%20dos%20engenheiros%20de,de%20inovação%20no%20campo%20industrial>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

COVOS, Jacqueline Sardela et al. O novo perfil de alunos do ensino superior, e a utilização de jogos lúdicos para facilitação do ensino aprendizagem. Revista Saúde em Foco, [s.i.], 10ª edição, p.62-74, jan. 2018.

CUNHA, M. B. Jogos de Química: Desenvolvendo habilidades e socializando o grupo. Eneq 028- 2004.

ENGENHARIA DE ALIMENTOS: O que faz. UFC. Disponível em: <<http://www.ufc.br/ensino/guia-de-profissoes/553-engenharia-de-alimentos>>. Acesso em: 7 mai. 2019.

FREITAS FILHO, Fernando Luiz, SCHRÖTER, Brigitte Augusta Farina. O uso de jogos didáticos no processo de ensino e aprendizagem no ensino superior: jogo da inovação. VIII Congresso Internacional de Conocimiento e Innovación. Guadalajara, 2018.

HOPPE, Luciana; KROEFF, Adriane Maria Santos. Educação Lúdica no Cenário do Ensino Superior. Veras, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 164, 23 out. 2014. ISE Vera Cruz. <http://dx.doi.org/10.14212/veras.vol4.n2.ano2014.art175>.

KISHIMOTO, Tizuko Morchida. O jogo e a educação infantil. São Paulo: Pioneira, 1994.

KIYA, Marcia Cristina da Silveira. O uso de jogos e atividades lúdicas como recurso pedagógico facilitador da aprendizagem. Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE. Produções didático-pedagógicas. Governo do Estado do Paraná. Ortigueira - PA. 2014.

MELO, C.M.R. As atividades lúdicas são fundamentais para subsidiar ao processo de construção do conhecimento. Información Filosófica. V.2 nº1 2005 p.128- 137.

RAU, M.C.T.D. A ludicidade na educação: uma atitude pedagógica. 20 ed. Curitiba. Ibpex, 2007. 164 p.

VONDROVÁ, Naďa; IHLHÁNOVÁ, Lucie. Tandemat – A Didactic Game for Secondary Mathematics and its Potential. Procedia - Social And Behavioral Sciences, [S.L.], v. 93, p. 488-493, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.09.225>

Capítulo 4



10.37423/220706277

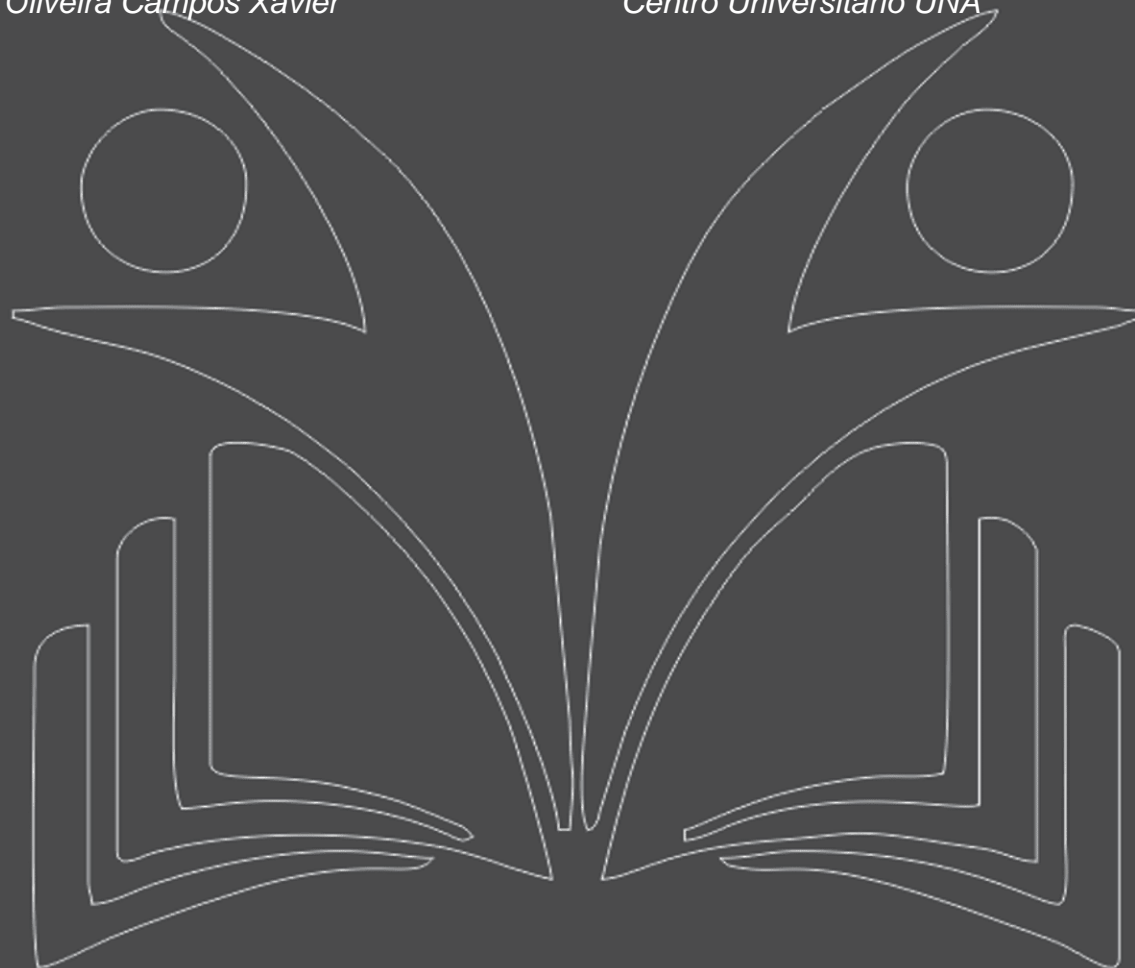
LABORATÓRIO DE CÁLCULO: APRENDIZAGEM BASEADA EM JOGOS NAS DISCIPLINAS DE EXATAS

André Felipe de Almeida Xavier

Centro Universitário UNA

Paloma de Oliveira Campos Xavier

Centro Universitário UNA



Resumo: O Laboratório de Cálculo surgiu com a necessidade de dar significado à aprendizagem dos alunos ingressantes nos cursos de Engenharia, na disciplina de Cálculo Diferencial, no primeiro semestre de 2016. Após a obtenção de uma boa percepção quanto a aplicação dessas práticas, a atividade foi ampliada também para as turmas de Geometria Analítica e Álgebra Linear (GAAL) e Cálculo Integral, de forma que esses alunos ingressantes dessem continuidade ao processo. Dessa forma esse relato corresponde ao semestre letivo 2/2016. Historicamente, os alunos apresentam certa dificuldade nesses conteúdos, sendo necessário dar significado à aprendizagem dos mesmos. Diante do quadro apresentado, o Laboratório de Cálculo tem como objetivo dar significado aos conteúdos trabalhados, dando autonomia aos alunos, tendo o professor na figura de tutor, como intermediador entre o aluno e o conhecimento, criando diversas atividades práticas, lúdicas e inovadoras para auxiliar nesse processo. Pretende-se através desse artigo, relatar um pouco sobre as atividades criadas para facilitar esse processo de execução do Laboratório de Cálculo, além de demonstrar os resultados obtidos e mensurados após sua aplicação. Através dessas atividades propostas, percebe-se que o aluno vai, aos poucos, conseguindo adquirir autonomia na busca pelo conhecimento.

Palavras-chave: Cálculo; Jogos matemáticos; Aprendizagem; Inovação.

1 INTRODUÇÃO

Os professores de matemática, nos diversos níveis de ensino (fundamental e médio) encontram dificuldades relacionadas ao alto nível de reprovações dos alunos nessa disciplina e às críticas que, historicamente, o ensino dessa disciplina tem recebido. No ensino superior, a situação não é diferente. Além da dificuldade clássica e histórica dos alunos em Matemática, estes chegam às faculdades e universidades apresentando dificuldades. Segundo Gusmão (2001), o déficit de aprendizagem representa uma falha no processo da aprendizagem que originou o não aproveitamento escolar.

Segundo Cunha (1997), o foco na prática pedagógica permite investigar o saber-fazer do professor em sua experiência cotidiana de sala de aula, lugar privilegiado onde se realiza o processo de ensino-aprendizagem, permeado pelas contradições do contexto social, visando analisar e compreender como acontece a prática pedagógica e por que ela acontece.

Diante desse contexto apresentado, juntamente com a necessidade de fugir da mesmice metodológica no ensino, surgiu a necessidade de aplicar nas aulas de Cálculo Diferencial o Laboratório de Cálculo, que é uma proposta pedagógica para os alunos ingressantes nos cursos de engenharia do Instituto Politécnico do Centro Universitário UNA. Posteriormente, além da manutenção das atividades para a disciplina de Cálculo Diferencial, foram criadas práticas para as disciplinas de Geometria Analítica e Álgebra Linear (GAAL) e Cálculo Integral.

As atividades que serão apresentadas a seguir, foram criadas por dois professores que lecionam no Centro Universitário UNA. Ambos professores lecionam disciplinas de exatas para o ciclo básico dos diversos cursos de engenharia da instituição, nos campi Contagem e Barreiro.

2 DESENVOLVIMENTO

A aprendizagem é muito mais significativa quando o aluno adquire significado para o conteúdo apresentado pelo professor em sala de aula. Neste momento, a aprendizagem evolui de mecânica, ou repetitiva, para significativa. Ao atribuir significado ao conteúdo, o processo de aprendizagem torna-se eficaz e perene, uma vez que alterou a estrutura cognitiva do aluno, através de associações pessoais e dependentes das experiências em sala de aula.

Para Freire (2002) não há docência sem discentes, e o conhecimento não deve ser pré-transmitido, mas construído conjuntamente, aceitando o novo, rejeitando qualquer forma de discriminação e valorizando a identidade de cada um. Romanowisk (2008) defende uma educação capaz de promover

o desenvolvimento humano, cultural, científico e tecnológico, dando condições aos alunos de atuarem e de responderem aos desafios de seu tempo e capazes de enfrentarem as incertezas.

Ainda nessa perspectiva, Freire (2002) defende uma prática educativo-progressista em favor da autonomia dos educandos, contrapondo-se ao modelo bancário de educação que privilegia a memorização massacrante de conteúdos descontextualizados das realidades dos alunos e sem espaço para reflexão crítica.

Para que esse processo de ensino-aprendizagem possa surtir efeito, faz-se necessário que o professor seja inovador. Para ocorrer essa inovação, deverá realizar mudanças em vários âmbitos no processo educativo, sendo uma delas o uso de metodologias ativas de aprendizagem. Essa nova vertente se desenvolve baseando a aprendizagem em jogos, envolvendo os alunos de forma dinâmica e direta, fomentando a aprendizagem significativa e a busca autônoma pelo conhecimento.

Destaca-se a necessidade de percepção do professor mentor das formas nas quais os alunos percebem e significam a realidade e o conteúdo apresentado. Por fim, não menos importante, a transcendência como atitude mentora do professor pode ser percebida no momento em que o aluno associa o conhecimento do conteúdo da disciplina do professor mentor em outras situações e vivências de aprendizagem.

2.1 METODOLOGIA

O Laboratório de Cálculo é uma atividade proposta para alguns professores dos cursos de Engenharia, que ministram as seguintes disciplinas: Cálculo Diferencial, GAAL e Cálculo Integral. Tais professores atuam nos campi da UNA localizados na grande BH e de forma autônoma.

Os professores idealizadores dessas atividades planejaram de forma conjunta as atividades aplicadas durante o segundo semestre letivo de 2016, pensando também na perpetuidade do projeto ao longo de outros semestres letivos.

O presente relato dessa experiência foi executado em duas unidades, Contagem e Barreiro – BH. As turmas que participaram dessa experiência foram as de Engenharia Mecânica: EGM1ANCOA – Contagem e EGM1ANBRA – Barreiro, ambas na disciplina de Cálculo Diferencial; EGM2ANCOA – Contagem e EGM2ABRA – Barreiro ambas na disciplina de Geometria Analítica e Álgebra Linear; e uma turma especial com alunos repetentes da disciplina de Cálculo Integral na unidade Barreiro.

Fazendo uma estimativa, podemos dizer que aproximadamente 300 alunos participaram dessas atividades.

Diversas atividades foram propostas durante esse semestre letivo, intercalando às aulas de conteúdo. Dependendo do conteúdo ministrado, foram aplicados jogos, dinâmicas, atividades ou estudos dirigidos. Foram aplicadas 10 atividades em cada disciplina, cada uma sendo avaliada em 2 (dois) pontos.

Os resultados apresentados ao final desse artigo, representa apenas uma comparação entre as notas de cada turma em duas avaliações aplicadas em um mesmo semestre letivo: a P1 é uma prova elaborada pelo próprio professor, aplicada no início do semestre valendo 30 pontos e a P2, prova integradora aberta avaliada em 10 pontos, aplicada ao final do semestre, após todas as atividades do Laboratório de Cálculo serem aplicadas.

2.2 ATIVIDADES UTILIZADAS – CÁLCULO DIFERENCIAL

MEMORIZANDO

Conteúdo: produtos notáveis, fatoração, propriedades logarítmicas e exponenciais.

Objetivo: Desenvolver no aluno a habilidade de memorizar todas as principais propriedades que envolvem produtos notáveis, fatoração, propriedades logarítmicas e propriedades exponenciais necessárias para o curso de cálculo.

Roteiro da atividade: o jogo foi desenvolvido no ambiente de sala de aula e em grupos. Pode ser aplicado também em outros espaços com mesas amplas ou bancadas, como sala de desenho técnico e biblioteca. Assim como um jogo de memória, o jogo foi desenvolvido em dois momentos, no primeiro os alunos relacionam as propriedades apresentadas. Em um segundo momento os alunos relacionam a aplicação das propriedades. Ganha o aluno de cada grupo que relacionar mais pares. Ambas as partes do jogo são preenchidas em uma folha de controle.



Figura 1: Jogo Memorizando

Fonte: autores (2016).

CAÇA AO TESOURO

Conteúdo: limites e continuidades e derivadas.

Objetivo: Compreender as regras de limites e de derivação.

Roteiro da Atividade: com um jogo desenvolvido em 10 grupos. Foram utilizados três pontos de apoio na UNA: Sala dos Professores, NSI e Portaria. Em cada ponto de apoio tinha 10 questões diversas e sortidas, uma para cada grupo. O grupo, ao chegar ao ponto de apoio, deveria escolher um número aleatoriamente que correspondia a uma determinada questão. Para poder pegar a questão, era necessário acertar a charada referente à questão. Com a questão em mãos, o grupo deveria tirar uma “selfie” no ponto de apoio para comprovar que todos integrantes do grupo estavam participando da atividade. Em seguida, voltaram para a sala de aula, mostrando que a questão estava lacrada. Dado o ok pelo professor, o grupo se reúne para resolver o problema (questão), mostra o resultado para o professor validar após acertar a mesma e aí sim dirigir para o próximo ponto de apoio. Ganha o grupo que terminar primeiro, de forma correta, as três questões.



Figura 2: Caça ao Tesouro

Fonte: Facebook UNA Contagem (2016)

DERINÓ

Conteúdo: intervalos de crescimento e decrescimento; pontos de máximo e mínimo; intervalos de concavidade e pontos de inflexão de funções.

Objetivo: Desenvolver nos alunos, de forma lúdica (através de um jogo de dominó), a habilidade de interpretar o comportamento de funções através de suas derivadas.

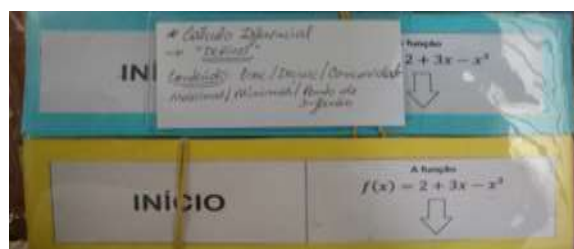


Figura 3: Derinó
Dados: autores (2016).

Roteiro da atividade:

1º PASSO: Os alunos receberão o Jogo Derinó com 7 peças, sendo 2 dessas peças: uma peça INÍCIO e outra peça FIM (figuras 4 e 5).



Figura 4: Peça início
Fonte: autores (2016).

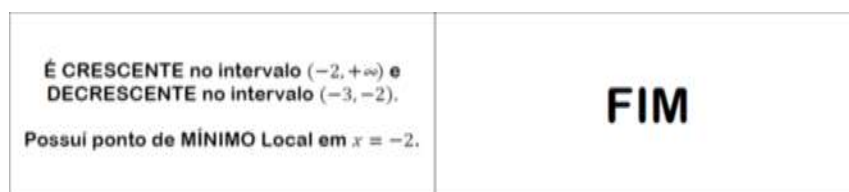


Figura 5: Peça fim
Fonte: autores (2016).

2º PASSO: O jogo começa na peça início, à direita dessa peça temos uma função (figura 6), diferente de um jogo de dominó convencional, as peças não são dispostas na sequência em posição lateral, elas serão dispostas em sequência abaixo da peça início. Ou seja, as peças serão colocadas uma abaixo da outra até chegar à peça fim.



Figura 6: Sequência do jogo

Fonte: autores (2016).

OTIMIZANDO

Conteúdo: aplicação de derivadas – problemas de otimização de área e volume.

Objetivos: interpretação de problemas; trabalhar em equipe; construir sólidos geométricos; desenvolver noção de escala; aplicar as regras de derivação; trabalhar um problema de forma concreta e aplicada; incentivar e motivar a competição sadia entre os grupos.

Roteiro da atividade: Dividido em 8 grupos, cada um deles deveria construir uma caixa sem tampa com o maior volume possível de acordo com as dimensões pré-estabelecidas e com um pedaço de barbante pré-definido, representar em um papel um estacionamento com a maior área possível. Ideal a realização da atividade em um espaço amplo, com mesas grandes e bancadas (sala de desenho técnico).

Ao final da atividade, cada grupo entregava uma folha, conforme o anexo abaixo, com os cálculos realizados para a construção da caixa e da área de estacionamento em escala. Foram criadas 5 folhas de atividades com valores diferentes, a fim de diversificar o tamanho das caixas e das área.



Figura 7: Caixa confeccionada prática otimizando.

Fonte: autores (2016).

2.3 ATIVIDADES UTILIZADAS – GAAL

DESENHOS ICÔNICOS

Conteúdo: Cônicas (parábola, hipérbole e elipse), Circunferência e Esfera.

Objetivo: verificar se os alunos conseguem relacionar as características de cada cônica (elipse, hipérbole e parábola) e sua respectiva representação gráfica.

Roteiro da atividade:

1º PASSO: Antes de começar os alunos devem virar todas as peças pelo seu verso (aparecendo apenas as letras A, B, C e D), cada aluno do grupo deve escolher uma letra, e recolher as três peças que contém a mesma letra.

2º PASSO: Após separadas as peças pela sua letra, cada aluno deve pegar a folha diagnóstico (Anexo 1) que representa a letra que ele escolheu. Em cada folha o aluno responsável por aquela letra, terá que executar os cálculos para desenhar corretamente (marcando todos os pontos nos espaços determinados), uma elipse, uma hipérbole e uma parábola.

3º PASSO: Após todos os alunos desenharem suas cônicas na folha de sua responsabilidade, eles deverão trocar as folhas e conferir os desenhos uns dos outros.

4º PASSO: Após a conferência os alunos deverão entregar as 4 folhas ao professor que marcará o tempo no quadro presente na primeira página da folha diagnóstico (Anexo 1). A equipe que desenhar o maior número de cônicas corretas no menor tempo será a equipe campeã.

SISTEMATIZANDO

Conteúdo: sistemas lineares.

Objetivo: desenvolvimento do raciocínio lógico e matemático.

Roteiro da atividade: Serão projetados através do Data Show várias imagens que representam diversos sistemas lineares através de desafios que são enviados diariamente nos grupos de whats app. Os alunos terão que escrever em uma folha de respostas o sistema linear correspondente à imagem projetada e o resultado de cada um deles.

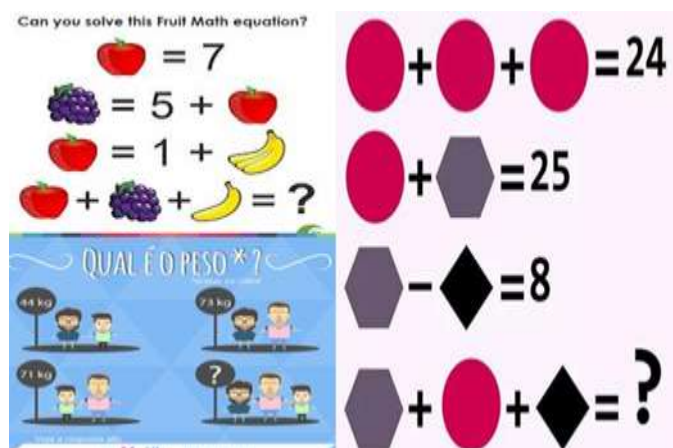


Figura 8: Jogo Sistematizando

Fonte: autores (2016).

ATIVIDADES UTILIZADAS – CÁLCULO INTEGRAL

CAMINHO INTEGRAL

Conteúdo: integrais indefinidas e definidas.

Objetivo: verificar se os alunos aprenderam a fazer a integral indefinida utilizando todas as principais primitivas e o método da substituição, em seguida verificar se sabem calcular a integral definida substituindo corretamente os limites de integração.

Roteiro da Atividade:

1º PASSO: Antes de começar o jogo os alunos devem retirar a última peça (com a palavra FIM) e embaralhar as 12 peças restantes. Após embaralhadas deverão distribuir aleatoriamente 4 peças para cada aluno.

2º PASSO: Com as 4 peças que cada aluno receber, eles deverão resolver as 4 integrais definidas presentes em cada peça numa folha de rascunho. Cada integral terá uma resposta diferente.

3º PASSO: Após resolverem todas as integrais deverão montar o caminho correto entre as peças, começando com a peça escrito INÍCIO (1ª peça) e terminando com a última peça, escrito FIM (13ª peça), retirada no início jogo. Assim teremos um caminho de integrais (Começando na 1ª peça até a 13ª peça).

4º PASSO: Com o caminho de integrais pronto, os alunos deverão transcrever para a folha diagnóstico a posição de cada peça (1ª peça até a 13ª peça) e apresentar a resolução de cada integral no espaço destinado.

3 RESULTADOS

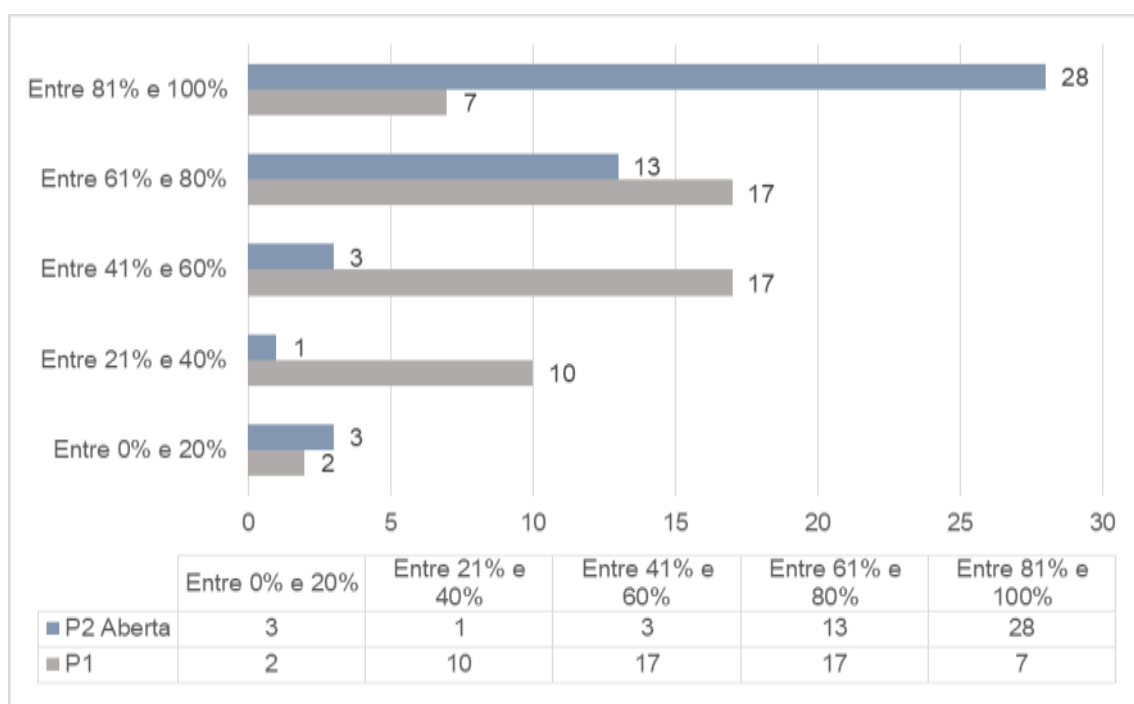
Podemos perceber que, ao longo do segundo semestre letivo de 2016, os alunos foram desenvolvendo a autonomia na busca do conhecimento e da informação, além de demonstrar prazer em desenvolver os jogos e dinâmicas propostas. Essa é uma percepção particular constatada durante as práticas e desenvolvimento das atividades. É importante enfatizar que o feedback e o grau de envolvimento dos alunos contribuem para formar esse quadro.

Os gráficos e tabelas apresentados a seguir, referem-se a dados coletados no final do semestre 2/2016, compactados em índices percentuais de aproveitamento das principais avaliações do semestre, P1 e P2 (aberta), elaboradas individualmente por cada professor. O aproveitamento do aluno corresponde à um percentual da nota obtida em cada prova em relação ao valor total da mesma.

3.1. CAMPUS CONTAGEM

Ao analisar de forma geral os dados, pode-se perceber a diferença no desempenho dos alunos das turmas que cursaram GAAL (2º Período) em relação a turma de calouros que cursaram Cálculo Diferencial.

Gráfico 1. Resultados obtidos turma EGM2ANCOA – GAAL

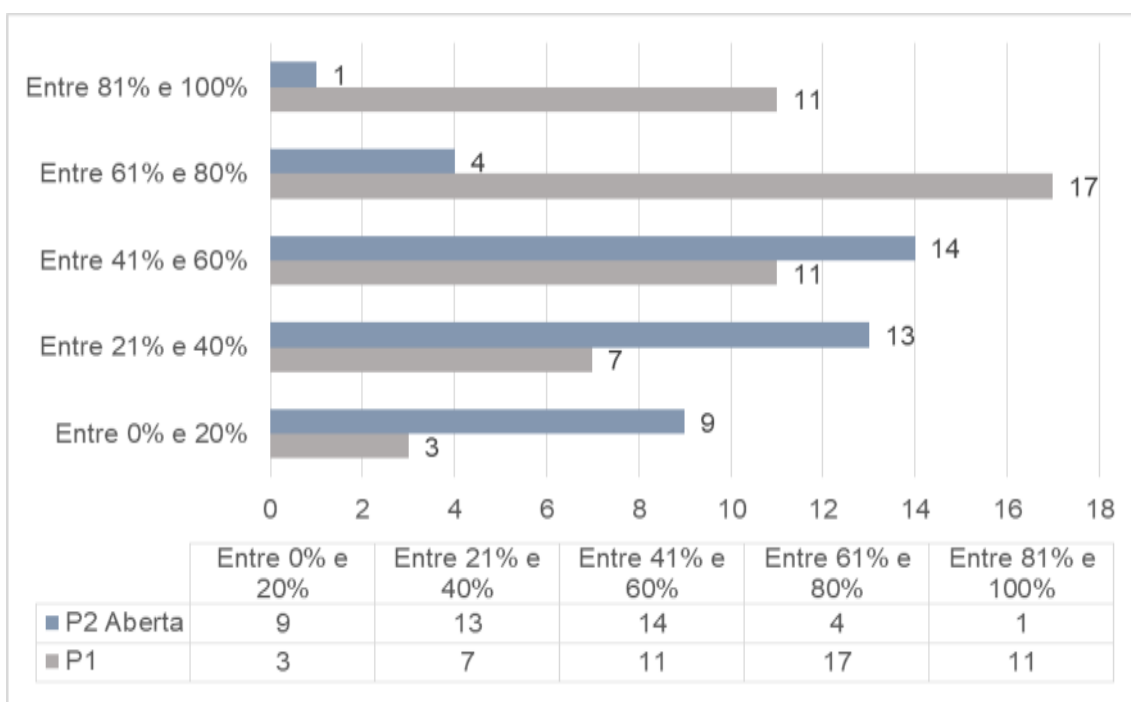


Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Nesta turma, percebe-se que o número de alunos que obtiveram aproveitamento entre 41% e 60% foi exatamente o mesmo daqueles que atingiram a nota na P1 entre 61% e 80%, 17 alunos em cada intervalo, representando aproximadamente 32% do total de alunos da sala. Pode-se perceber que, comparando os resultados apresentados na avaliação P1 (esta realizada no início do semestre) em relação à P2 aberta (realizada no fechamento do semestre letivo), ocorreu uma melhora no desempenho dos alunos, enquanto na P1 a maioria dos alunos obtiveram um aproveitamento entre 41% e 80%, na avaliação P2 aberta estes migraram, positivamente para ao intervalo de 61% à 100% de aproveitamento.

Essa mudança no aproveitamento da turma, comparando ambas avaliações, pode ser indicado pelo fato destes alunos perceberem melhor as propostas apresentadas pelo Laboratório de Cálculo, já que os mesmos realizaram as atividades propostas com grande envolvimento e empenho no semestre anterior. Outro fator importante é o nível de maturidade que a turma vai atingindo com o passar dos semestres. Esta mesma turma já realizou anteriormente as atividades do Laboratório de Cálculo I, na disciplina de Cálculo Diferencial, fator que ajuda positivamente o desenvolvimento das atividades.

Gráfico 2. Resultados obtidos turma EGM1ANCOA – Cálculo Diferencial



Fonte: Dados da pesquisa (2016).

O gráfico 2 demonstra a comparação dos resultados obtidos pelos alunos de Engenharia Mecânica na disciplina de Cálculo Diferencial. Percebe-se um equilíbrio no percentual obtido na avaliação P1,

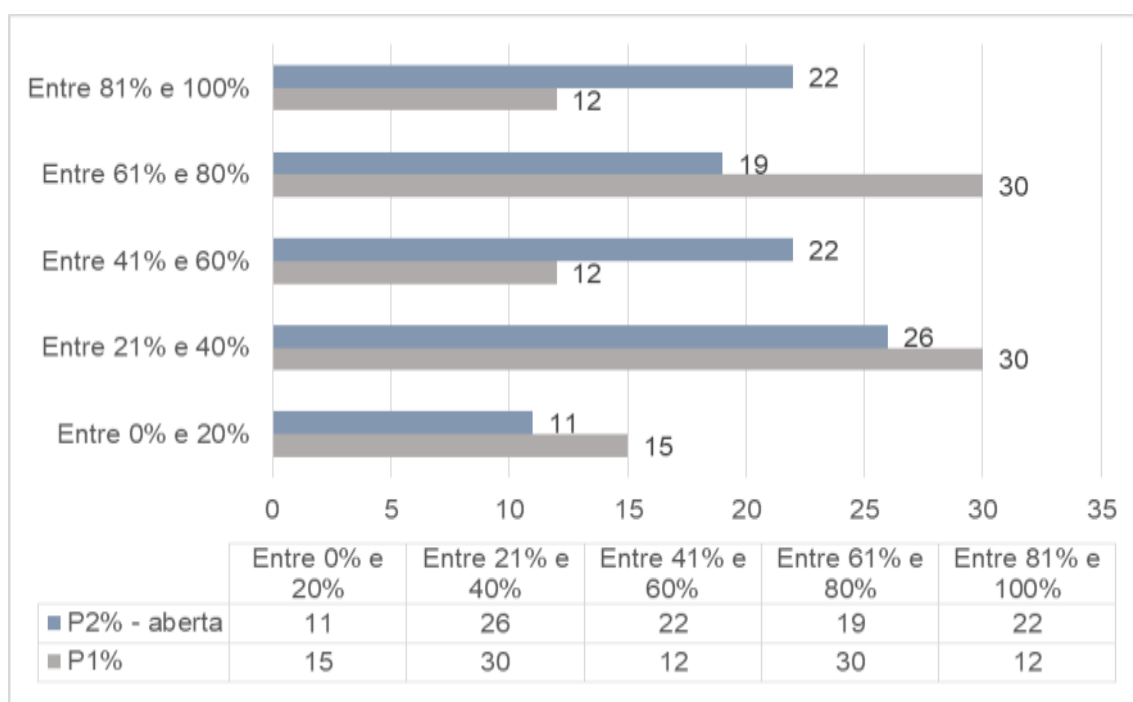
quando observado os intervalos acima de 41%, com certo destaque para o intervalo que varia de 61% a 80%, contemplando o número de 17 alunos, ou seja, 34% do número de alunos matriculados até o momento.

É notável a discrepância de aproveitamento entre a avaliação P1 e a avaliação P2. Pode-se indicar como possível causa dessa queda no desempenho o fato da P2 ser a última avaliação do semestre e, muitos desses alunos, por terem tido um bom desempenho na avaliação P1, não se prepararam corretamente para essa avaliação. Esse tipo de comportamento é diretamente relacionado ao tipo de conduta que a maioria destes tem no Ensino Médio, principalmente se tratando de escolas públicas.

3.2. CAMPUS BARREIRO

Analisando individualmente as turmas participantes dos jogos do Laboratório de Cálculo no campus Barreiro, percebe-se nesse caso que também os alunos apresentaram um melhor desempenho na avaliação P1 em relação à P2 aberta.

Gráfico 3. Resultados obtidos turma EGM1ANBRA – Cálculo Diferencial



Fonte: Dados da pesquisa (2016).

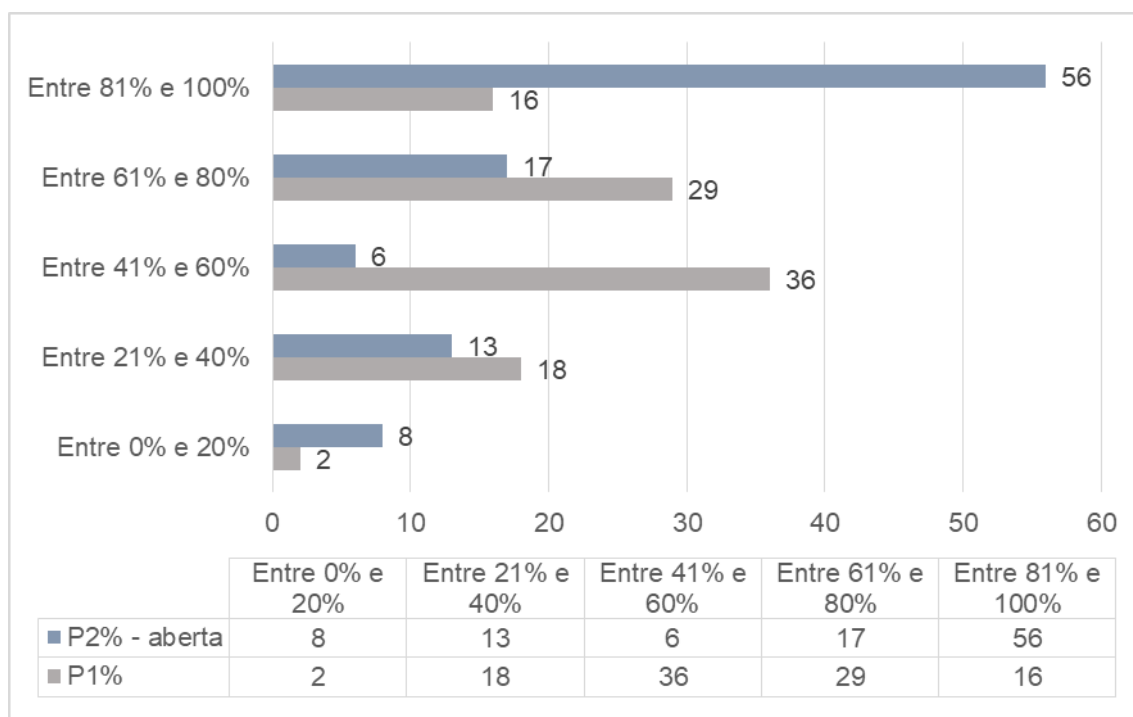
Analisando os dados da turma EGM1ANBRA, conforme apresentado no gráfico 3, percebe-se que ao observar o percentual de aproveitamento entre 81% à 100%, os alunos tiveram um melhor aproveitamento na P2 aberto em relação à avaliação P1. Comparando o próximo intervalo percentual

compreendido entre 61% e 80%, pode-se notar que os alunos tiveram um melhor aproveitamento na P1 em relação à avaliação P2.

O aproveitamento atingido pela turma do segundo módulo de Engenharia Mecânica na disciplina de GAAL, conforme pode ser visto no gráfico 4, também se assemelha aos apresentados no campus Contagem, com os alunos apresentando um ótimo resultado na avaliação P2 aberta, com mais da metade dos alunos atingindo o intervalo de 81% a 100%. Por outro lado, a concentração da maioria das notas da P1 está presente nos dois intervalos compreendidos entre 41% e 80%.

Esses dados permitem constatar que os alunos assimilaram bem as atividades propostas pelo Laboratório de Cálculo na disciplina de GAAL (Geometria Analítica e Álgebra Linear) durante todo o semestre e a importância de participar das atividades propostas. Fato esse destacado pela melhora no aproveitamento das notas durante o semestre. Importante dizer também que os alunos já realizaram as atividades do Laboratório de Cálculo na disciplina de Cálculo Diferencial no semestre anterior, facilitando o entendimento e a aplicabilidade das atividades e jogos propostos.

Gráfico 4. Resultados obtidos turma EGM2ANBRA – GAAL,



Fonte: Dados da pesquisa (2016).

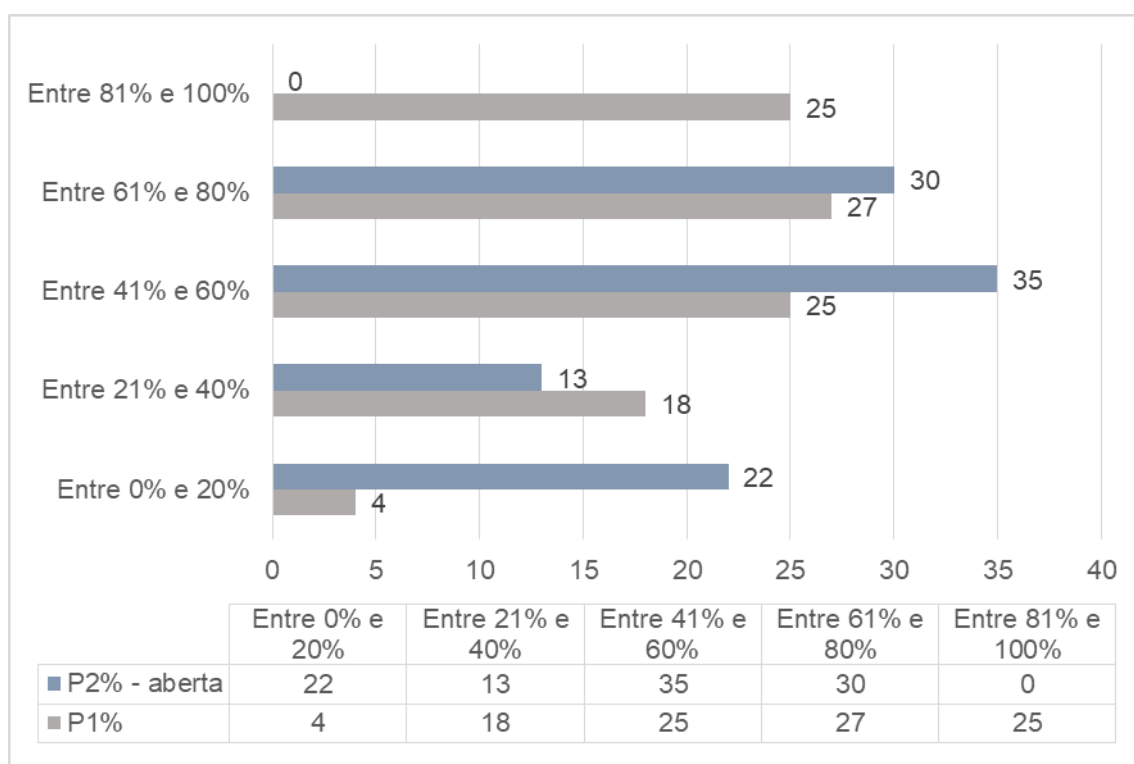
Por fim, analisando a turma especial de sábado da disciplina de Cálculo Integral, pode-se perceber que na avaliação P1, aproximadamente metade dos alunos alcançaram um aproveitamento superior a

61%, enquanto que ao analisar a P2 nota-se que cerca de dois terços dos alunos obtiveram uma pontuação compreendida entre 41% e 80%.

Essa turma especial é formada exclusivamente por alunos que já cursaram a disciplina anteriormente e foram reprovados. Essa disciplina foi ministrada aos sábados com carga horária de 4 horas/aula direto, um dos motivos que podem ter contribuído para o desempenho da turma representado no Gráfico 5.

Outro motivo a ser destacado que pode ter contribuído para o desempenho da turma é o fato dos alunos terem cursado a matéria anteriormente, mesmo que reprovados. É importante frisar que muitos destes já sabem a grade curricular da disciplina de Cálculo Integral e os itens a serem trabalhados durante o semestre letivo, mesmo que não tenham tido um desempenho satisfatório anteriormente.

Gráfico 5. Resultados obtidos turma especial – Cálculo Integral



Fonte: Dados da pesquisa (2016).

A fim de melhor ilustrar os resultados obtidos, os dados apresentados na tabela 1 demonstram uma breve comparação entre o aproveitamento médio das turmas, através do cálculo de uma média aritmética ponderada pela mediana de cada intervalo de aproveitamento.

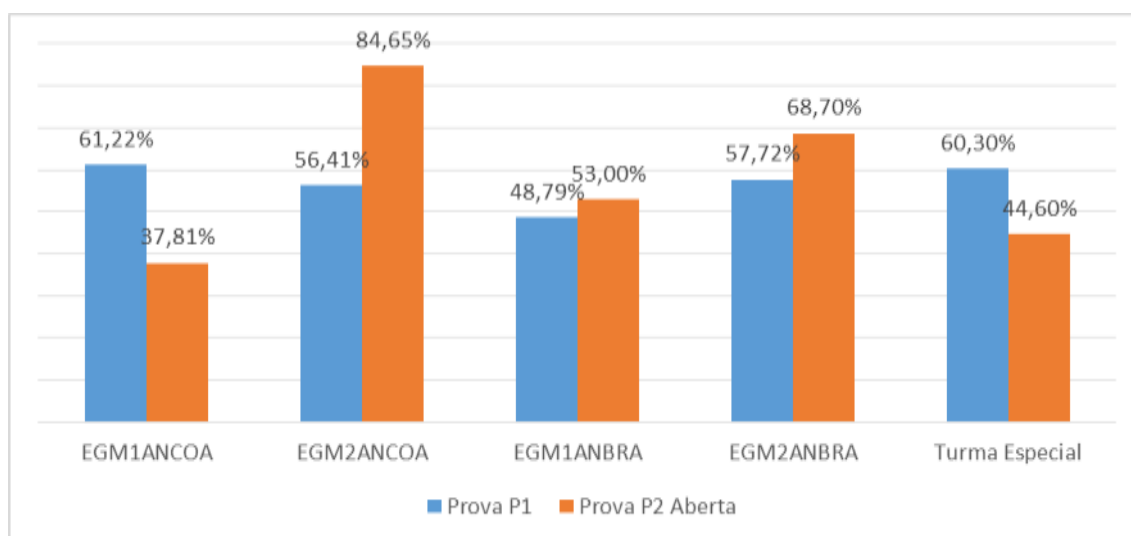
Tabela 1. Aproveitamento médio das turmas

Turma	Prova P1	Prova P2 Aberta	Desistência
EGM1ANCOA	61,22%	37,81%	8
EGM2ANCOA	56,41%	84,65%	5
EGM1ANBRA	48,79%	53,00%	0
EGM2ANBRA	57,72%	68,70%	1
Turma Especial	60,30%	44,60%	0

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

Percebe-se nitidamente que as turmas EGM1ANCOA, na disciplina de Cálculo Diferencial e a Turma Especial, na disciplina de Cálculo Integral, obtiveram melhor êxito na Prova P1 em relação à Prova P2. Demonstrando mais equilíbrio, a turma EGM1ANBRA, na disciplina de Cálculo Diferencial obteve um resultado mais uniforme, tendendo um pouco mais para um melhor aproveitamento na Prova P2 Aberta.

O gráfico 6 ajuda a compreender melhor os dados apresentados e analisados anteriormente.

Gráfico 6. Aproveitamento médio das turmas

Fonte: Dados da pesquisa (2016).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final de do segundo semestre letivo de aulas de Cálculo Diferencial, GAAL e Cálculo Integral no Laboratório de Cálculo, foi possível perceber que muitos alunos avaliaram positivamente a mudança comportamental e metodológica das aulas. Essa avaliação foi feita de forma espontânea e não obrigatória, para ser documentados e também nortear o trabalho realizado. Segue o depoimento de um dos alunos que participaram dessas atividades:

Aluna A: Venho por meio deste e-mail para falar sobre as inovadoras aulas que tive com você. Foram aulas bem diferentes de tudo que já vi em cálculo, sendo também interessantes, divertidas e dinâmicas. Eu sei que em cálculo fica difícil mudar a rotina das aulas, porque o aluno só aprende fazendo exercícios. Aquele laboratório de cálculo do Otimizando, as atividades de otimizar a caixa e calcular o comprimento daquele barbante foram inesquecíveis. Foi muito satisfatório ver a aplicação do que aprendemos em sala com você. O laboratório também do Limitados foi bem divertido, onde tínhamos que percorrer a Una atrás das charadas e conseguir as perguntas para respondê-las. Além de tudo que citei antes, essas atividades promoveram também o trabalho em equipe que é muito importante. Essas atividades com certeza foram muito importantes para fixar o aprendizado do conteúdo e até para nos prepararmos para as provas. Você me surpreendeu com essas atividades, parabéns pela iniciativa e que tenhamos sempre aulas como essa! Muito obrigada e um abraço.

Ao utilizar essas atividades, com metodologias ativas de aprendizagem, estimulou-se nos alunos o desenvolvimento de algumas habilidades, como a criatividade, liderança, comunicação, criticidade, capacidade de argumentação e reflexão. Habilidades estas desenvolvidas sem desconsiderar a importância do conteúdo da disciplina.

Destaca-se também a importância da ressignificação para os alunos do conceito do erro como ato punitivo da aprendizagem, uma vez que as atividades do Laboratório de Cálculo permitem também avaliar o aluno qualitativamente, levando em conta seu envolvimento, participação e pro atividade.

Estas mudanças nos exigiram um novo papel, que pode ser traduzido na intencionalidade e reciprocidade em ensinar um conteúdo contextualizado e que transcenda a sala de aula. Quando se poderia imaginar em uma aula de exatas o aluno correndo pelo campus em busca de charadas onde os mesmos deveriam resolver desafios relacionados ao conteúdo?

Reconhecendo que o saber docente está além do saber da disciplina, preparamos aulas diferenciadas de cálculo diferencial, cálculo integral e GAAL para fomentar o processo de aprendizado do aluno. A contextualização do conteúdo foi uma premissa para a criação dos jogos e desafios, sendo perceptíveis o envolvimento dos alunos.

Ao final do trabalho, percebemos que o processo de desenvolvimento da autonomia no aluno e busca da informação é longo, e diretamente relacionado ao nível de maturidade que o mesmo vai atingido durante a sua vida acadêmica. É nítido que esse tipo de atividade é de fundamental importância para formação do aluno. Vale lembrar que essas atividades são efetivamente eficazes quando associada às aulas expositivas dos conteúdos de cada disciplina.

Além disso, é de fundamental importância o papel do professor em perceber as limitações dos alunos ao buscar o conhecimento. Alguns conseguem desenvolver as atividades com mais facilidades, outros não. Esse papel de mentoria é primordial para o sucesso das atividades e jogos apresentados.

Constatamos que todas as atividades desenvolvidas podem ser consideradas inovadoras no processo de aprendizagem das disciplinas apresentadas e que para criar aulas diferenciadas não se exige muito, basta um pouco de criatividade e disponibilidade para confeccionar os jogos e dinâmicas.

REFERÊNCIAS

CUNHA, Maria Isabel da. O bom professor e sua prática. Campinas, SP: Papirus, 1997. (Coleção Magistério: Formação e Trabalho Pedagógico).

FREIRE, Paulo. Pedagogia da autonomia. Saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 2002.

GUSMÃO, Bianca B. de. Dificuldade de aprendizagem: um olhar crítico. Pará: UAM, 2001.

ROMANOWSKI, Joana Paulin. Formação e profissionalização docente. 3. ed. Curitiba: Ibpex, 2008. 196 p.

Capítulo 5



10.37423/220706300

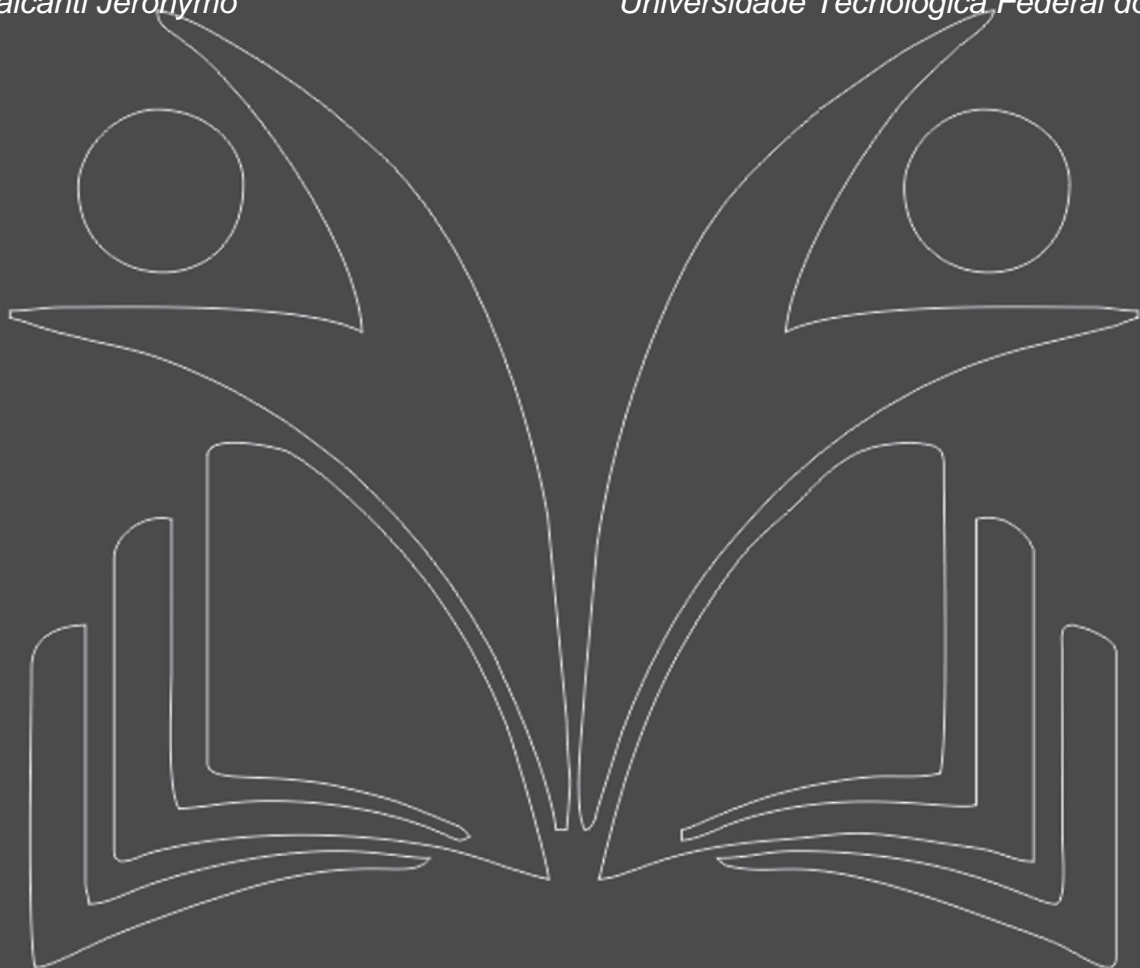
DISCRETE SMITH PREDICTOR COMPENSATOR: DESIGN, PID TUNING AND APPLICATION

Antonio Augusto Rodrigues Coelho

Universidade Federal de Santa Catarina

Daniel Cavalcanti Jeronymo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Abstract: The paper presents the discrete design for tuning the proportional-integral-derivative controller by using the Smith predictor control structure. A feedback filter is inserted to enhance the control loop and to achieve the closed-loop specifications for reference tracking and disturbance rejection. Processes with different characteristics are conducted including a dominant dead time case study. Numerical and experimental simulations are carried out on various systems. The effectiveness of the dead time compensating PID tuning over the standard PID tuning methods is shown to be able to meet the desired performance and to decrease the impact of the dead time over the closed-loop stability.

Keywords: Smith predictor, closed-loop performance, PID tuning, dead time, analysis, phase margin, simulation, stability.

INTRODUCTION

In spite of the consolidation of the PID algorithm encountered in process industries, as a popular device, robust performance and familiar for engineers, an unsatisfactory closed-loop control stability can rise when the controlled system has high order or long dead time characteristic. Delays arise in various manufacturing applications, e.g., in a pipeline, on a steel conveyer belt or in rolling mills (measured variable does not respond to an input change for a period). Under this situation (plants with long dead time) the response obtained is very sluggish [4], [5].

A large number of tuning rules have been given in the process control literature to set up the PID controller gains. However, when the dead time/time constant ratio is large, PID calibration can be difficult to obtain and the closed-loop dynamic can become unstable [1], [8]. When time delay is dominant, the Smith predictor is known as an effective dead time compensator and can give superior performance than simple feedback control structures. The Smith predictor, a classical and popular control scheme, is the first control structure studied to overcome the dead time problem [11]. The idea of the Smith predictor configuration is to move the effect of the dead time to outside the controlled system loop. The presence of a dead time imposes difficulties in designing PID control systems (the additional phase lag from the dead time tends to destabilize the control loop). Therefore, investigations on the scientific and industrial communities are still emerging to improve the closed-loop dynamic performance or to tune PID parameters and can be found in [3], [7], [10], [12], [13], [16].

Despite of complex conditions for a wide class of systems, there is still a need of discrete domain comparative analysis regarding the performance of closed-loop systems for dead time compensators. In addition, few numbers of tuning guidelines are available for determination of the PID parameters to deal with long dead time processes, especially in real world of discrete systems [1], [5]. All the process control analysis done to date of 1990 was conducted for the continuous case [17]. References [2], [3] typically have discussed the discrete PID tuning from the equivalency of the continuous form using rectangular or trapezoidal approximations. In addition, many dead time compensation implementation studies are based on the continuous Simulink block diagram which is not suitable to the practical point of view, as described in [13], [15]. Hence, the motivation of this paper is to present a discrete PID tuning design to control dead time systems using the filtered Smith predictor compensator. Furthermore, the discrete implementation of the PID tuning is evaluated with other tuning methods and comparative simulation results are provided.

The paper is organized as follows. In section 2 the theoretical background of the filtered Smith predictor control scheme is provided as well as the steady-state characteristics for servo and regulatory responses. In section 3 the filtered Smith predictor is connected to the PID controller to find out the discrete PID tuning. Numerical simulations are shown in section 4 while experimental results obtained with a temperature laboratory setup are described in section 5. Finally, conclusions are given.

DISCRETE PID AND MODIFIED SMITH PREDICTOR DESIGN

The PID controller has several implementation structures that depend of the manufactured equipment in industrial systems. The PID controller, in the ideal form, is popular and is presented in many digital industrial controllers. An excellent review of the PID design equations are given in references [5], [9], [15]. Continuous and discrete PID control expressions are given by

$$C_{PID}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_c \left\{ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right\} \quad (1)$$

$$C_{PID}(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \beta_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})} \quad (2)$$

$$\beta_0 = K_c \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right), \quad \beta_1 = -K_c \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right), \quad \beta_2 = K_c \frac{T_d}{T_s}$$

where K_c , T_i , T_d and T_s are the proportional, integral, derivative gains and sampling period, respectively. The signals $y(\cdot)$, $u(\cdot)$, $r(\cdot)$ and $e(\cdot) = r(\cdot) - y(\cdot)$ denote the output, control, reference and error. Equation (2) is adequate for real-time implementations, simple to be understood by the user and can be embedded in digital devices as PLCs and microcontrollers [2], [4], [9].

There are different types of control problems in the process industry (long dead time, inverse response and high order), that have attracted attention of process control researches for many decades. An interesting solution to control these complex systems is to use the Smith predictor compensator design that is the more popular and effective over the classical PID controller scheme. Other control structures, including Dahlin algorithm and Internal Model Controller (IMC), are not assessed in this paper [6], [7], [13], [15], [16]. The Smith predictor diagram can be represented in many ways. The modified discrete Smith predictor to deal with long dead time is shown in Figure 1, as discussed in [1], [7], [12].

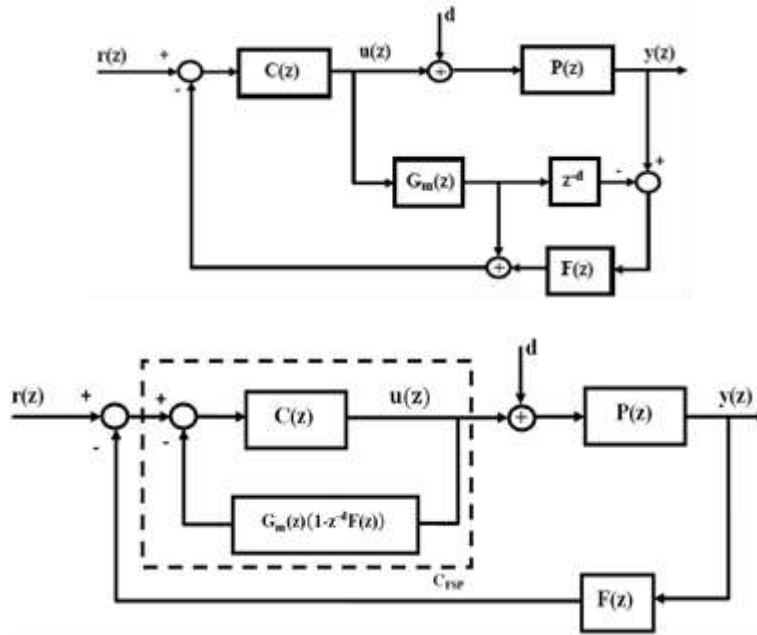


Figure 1. Equivalent control block diagram for the filtered Smith predictor.

References [7], [10] have demonstrated that the digital filter gives an extra degree of freedom for the Smith predictor controller to deal with modeling errors and unmeasurable load disturbances. Equation (3) is a low-pass filter, $F(z)$ with unitary gain, applied to the modified discrete version of the Filtered Smith Predictor (FSP), to improve the robustness and effectiveness of the controlled system [1], [7], [8], [12].

$$F(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^n} \rightarrow F(z) = \frac{(1 - \alpha)^n}{(1 - \alpha z^{-1})^n} \quad (3)$$

The parameters α and n are selected by the user to ensure the desired closed-loop specifications, where $\alpha = \exp(-T_s/T_f)$. Small values for T_f give control magnitudes with aggressive magnitude [5], [7].

As shown in Figure 1, the resulting controller of the modified Smith predictor transfer function can perform the PID parameters and is obtained from the expression

$$C_{FSP}(z) = \frac{C(z)}{1 + C(z)G_m(z)(1 - z^{-d}F(z))} \quad (4)$$

Concerning closed-loop properties, setpoint tracking and disturbance rejection, the transfer functions can be rearranged as

$$\frac{y(z)}{r(z)} = \frac{C(z)P(z)}{1 + C(z)P(z)F(z) + C(z)G_m(z)(1 - z^{-d}F(z))} \quad (5)$$

$$\frac{y(z)}{d(z)} = \frac{P(z)[1 + C(z)G_m(z)(1 - z^{-d}F(z))]}{1 + C(z)P(z)F(z) + C(z)G_m(z)(1 - z^{-d}F(z))} \quad (6)$$

and under perfect modeling, $P(z) = z^{-d}G_p(z) = P_m(z) = z^{-d}G_m(z)$, it is possible to write

$$\frac{y(z)}{r(z)} = \frac{z^{-d}C(z)G_m(z)}{1 + C(z)G_m(z)} \quad (7)$$

$$\frac{y(z)}{d(z)} = \frac{z^{-d}G_m(z)[1 + C(z)G_m(z)(1 - z^{-d}F(z))]}{1 + C(z)G_m(z)} \quad (8)$$

To guarantee offset free condition, i.e., the effect of the closed-loop system behavior on the value of the steady-state error is zero, the polynomials $C(z)$ and $G_m(z)$ of the filtered Smith predictor control structure take the following forms:

$$C(z) = \frac{A(z^{-1})}{R(z^{-1})} \quad (9)$$

$$G_m(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na}} \quad (10)$$

$$R(z) = \Delta = (1 - z^{-1}) \quad (11)$$

where $A(z^{-1})$ and $B(z^{-1})$ are the polynomials representing the open-loop poles and zeros of the plant model that can be achieved from off-line or on-line self-tuning approaches, i.e., using the recursive least squares estimator [4], [5], [15].

From the previous equations it can be noted that the poles of the model are zeros of $C_{FSP}(z)$ and so, if the model is a good approximation of the real plant, the controller can perform a zero/pole cancelation independently by the values of the PID parameters. Therefore, with a good model, $P(z) = P_m(z)$, the PID controller can be tuned as it would be for a process without a dead time, achieving its best performance.

RELATIONSHIPS OF DISCRETE FILTERED SMITH PREDICTOR AND PID CONTROLLER

Next, the filtered Smith predictor equation is changed into ideal PID controller transfer function, i.e., manipulating equations (2) and (12), according to Figure 1, to guarantee not only closed-loop dynamic properties of the filtered Smith predictor but also to give a robust stability with a good controller parameter set. This tuning rule, to calibrate PID control gains, can be implemented in a number of applications and digital devices. Tuning methods for PID algorithms are still in a state of research [1], [13], [15]. To ensure that the discrete filtered Smith predictor has the PID formulae as in equation (2), it is necessary to rewrite equation (4) as follows:

$$C_{FSP}(z) = \frac{A(z^{-1})(1 - \alpha z^{-1})^n}{\Delta(1 - \alpha z^{-1})^n + B(z^{-1})[(1 - \alpha z^{-1})^n - (1 - \alpha)^n z^{-d}]} \quad (12)$$

However, the term $[(1 - \alpha z^{-1})^n - (1 - \alpha)^n z^{-d}]$ from equation (12) can be rewritten by

$$(1 - z^{-1}) \left[1 + \sum_{i=1}^{d-1} (1 - \alpha)^n z^{-i} + \sum_{i=2}^n \sum_{j=i}^n c_j \alpha^j z^{-(i-1)} (-1) \right] \quad (13)$$

and applying $z \rightarrow 1$ on the second part of equation (13) results

$$\left[1 + (d-1)(1 - \alpha)^n + \sum_{i=2}^n \sum_{j=i}^n c_j \alpha^j (-1) \right] \quad (14)$$

with $c_i = \text{coeffs}[(1 - \alpha)^n]$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$, where $(1 - \alpha)^n = c_0 + c_1 \alpha + \dots + c_n \alpha^n$. Using equation (14) in (12) then

$$\frac{(1 - \alpha)^n}{(1 - \alpha)^n + B(1) \left[1 + (d-1)(1 - \alpha)^n + \sum_{i=2}^n \sum_{j=i}^n c_j \alpha^j (-1) \right]} \frac{A(z^{-1})}{\Delta} \quad (15)$$

Equations (2) and (15) can be compared to provide the corresponding settings of the hybridized FSP-PID control law as follows:

$$K_c = -\bar{K}(a_1 + 2a_2) \quad (16)$$

$$T_i = \frac{-(a_1 + 2a_2)T_s}{(1 + a_1 + a_2)} \quad (17)$$

$$T_d = \frac{-a_2 T_s}{(a_1 + 2a_2)} \quad (18)$$

$$\bar{K} = \frac{(1 - \alpha)^n}{(1 - \alpha)^n + B(1) \left[1 + (d-1)(1 - \alpha)^n + \sum_{i=2}^n \sum_{j=i}^n c_j \alpha^j (-1) \right]} \quad (19)$$

There is no restriction on the order of $B(z^{-1})$, the open-loop zeros of the process model. However, the open-loop poles, see equation (10), must be 2 in order to validate the equation (15), the FSP-PID controller. The PID controller settings are simple in terms of the plant model and filter parameters. When $F(z)$ is equal to 1, the original Smith predictor control scheme of Figure 1 is achieved [11], [12].

NUMERICAL SIMULATION RESULTS

In all the following numerical simulation studies, the parameters of the reference and load disturbance signals are 1 and 0.3. The control design objective is to ensure stability, setpoint tracking and load disturbance rejection.

In real applications, it is evident that the model does not represent the process because the dynamic is varying according to the equilibrium point or plant-model mismatch. One possible alternative to improve the quality of the closed-loop system, in the presence of modeling errors, is to use advanced controllers such as self-tuning or auto-tuning design approaches [5], [10], [12], [15]. However, these control methodologies are not used in this paper and it is assumed that plant and model are known in advance.

NUMERICAL SIMULATION: EXAMPLE 1

As a first numerical experiment (example described in [14]) the following FOPDT system is considered. The process and model transfer functions are given by

$$P_1(s) = P_{m1}(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} = \frac{e^{-0.5s}}{s + 1} \quad (20)$$

Closed-loop specifications are smooth process response and without ringing for the control signal based on step setpoint tracking and unmeasurable disturbance applied at the middle of the simulation time. To assess the filtered Smith predictor for PID tuning shown in this paper, two classical PID tuning methods, from the process control literature, are used (shown in Table 1) and implemented [6], [14], [16] (for comparison purposes of servo and regulatory responses).

Table 1. PID gains.

Padma Rule	$K_c K_p = \frac{\tau}{\theta} + 0.5$	$T_i = \tau + 0.5\theta$	$T_d = \frac{0.5\theta(\tau + 0.1667\theta)}{\tau + 0.5\theta}$
IMC Rule	$K_c = \frac{2\tau + \theta}{2K_p(\lambda + \theta)}$	$T_i = \tau + \frac{\theta}{2}$	$T_d = \frac{\tau\theta}{2(\lambda + \theta)}$

For the stable FOPDT model of equation (20), the Padma tuning gains are $K_c = 2.5$, $T_i = 1.25$, $T_d = 0.2167$ (this technique does not provide any extra tuning parameter and the PID controller has been tuned very badly) and the IMC tuning procedure gives $K_c = 1.25$, $T_i = 1.25$, $T_d = 0.25$ (filter time constant of Table 1 is selected as $\lambda = 0.5$). The design parameters for the FSP-PID tuning method presented in this paper are: $K_c = 0.379$, $T_i = 1.0617$, $T_d = 0.2112$ (filter time constant is $T_f = 0.5$, $n = 1$, sampling period is

0.5 s). Figure 2 shows the corresponding closed-loop dynamic results. It is observed that the FSP-PID tuning improves the control performance and guarantees the desired dynamic (without overshoot, smooth control behavior and small elapsed time of the dead time).

NUMERICAL SIMULATION: EXAMPLE 2

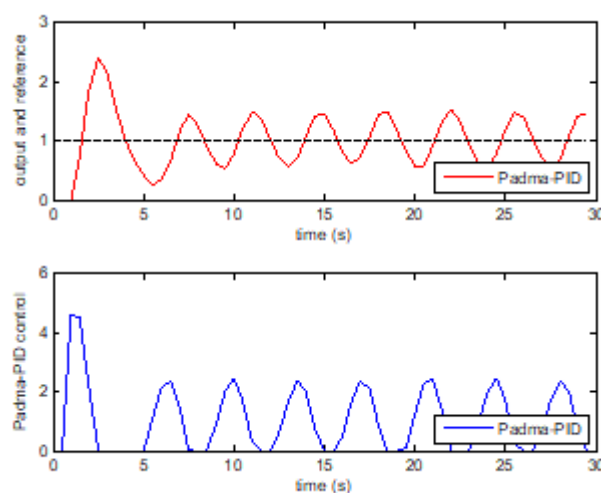
The second experiment considers an oscillatory second-order process and is represented by the following transfer function (underdamped behavior with long settling time and dead time characteristics as described in [13]):

$$P_2(s) = P_{m2}(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1} = \frac{e^{-15s}}{s^2 + 0.2s + 1} \quad (21)$$

The same transfer function is assumed to the process model. The desired response target is a small overshoot and a low oscillation for the control signal magnitude. Equation (21) induces the parameters as $K_p = 1$, $\tau = 1$, $\vartheta = 15$, $\xi = 0.1$. To verify the effectiveness of the discrete FSP-PID, a robust PID tuning proposed in [2] for equation (21), generates the following parameters:

$$K_c = \frac{2\xi\tau}{K_p(\lambda + \theta)}, \quad T_i = 2\xi\tau, \quad T_d = \frac{\tau}{2\xi} \quad (22)$$

where $\lambda = \max(0.25\vartheta, 0.2\tau)$ and the ideal PID gains of equation (1) are $K_c = 0.0107$, $T_i = 0.2$, $T_d = 5$. The corresponding setpoint and disturbance responses with I. Chien in [2], [6] and FSP-PID methods, to tune the PID controller, are shown in Figure 3.



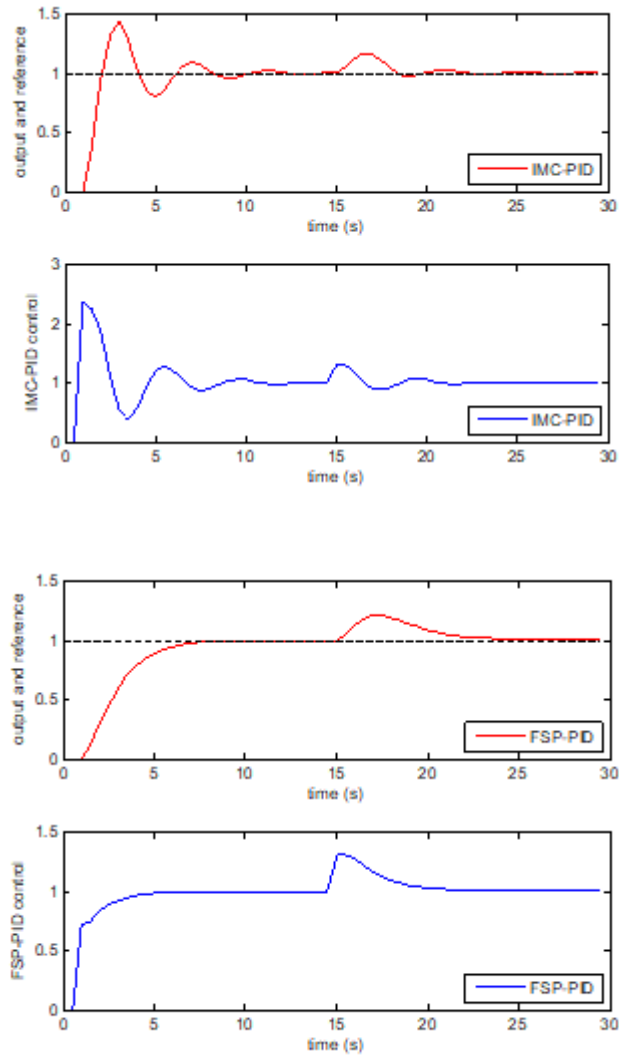


Figure 2. Output and input responses of example 1.

It can be observed that, when a step setpoint occurs, the overshoot is large by using the tuning set of equation (22). The PID employed with the filtered Smith predictor reduces the impact of the dead time and improves the dynamic performance for the resulting PID calibration: $K_c = 0.029$, $T_i = 0.7825$, $T_d = 1.2556$ (filter time constant is $T_f = 11.25$, $n = 1$, sampling period is 1 s). The FSP-PID control technique performed well for disturbance rejection with good behavior in tracking error.

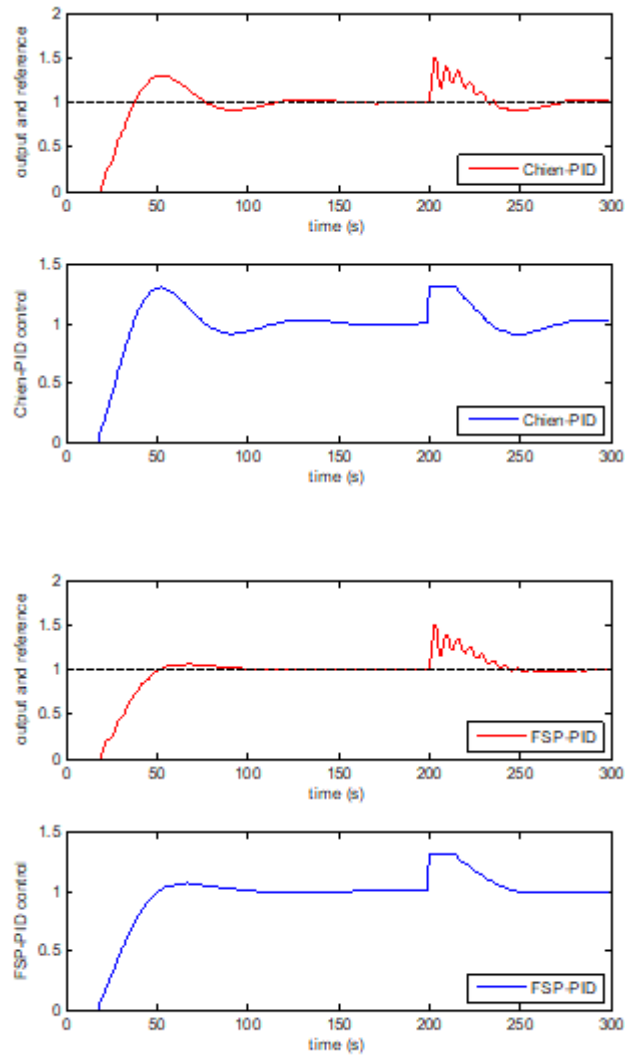


Figure 3. Output and input responses of example 2.

NUMERICAL SIMULATION: EXAMPLE 3

As a third numerical experiment, a fourth order process (high order system) is considered. In this case study the dead time is greater than the time constant. The plant transfer function is given by

$$P_3(s) = \frac{e^{-9.7s}}{(s+1)(0.5s+1)(0.25s+1)(0.125s+1)} \quad (23)$$

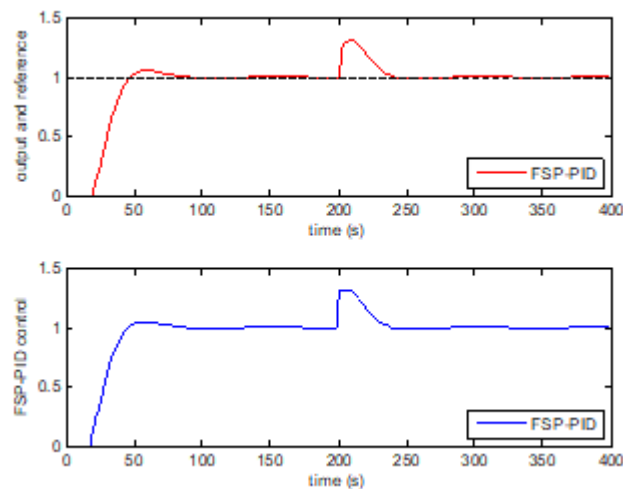
For control tuning purposes, an estimated second-order model is determined as

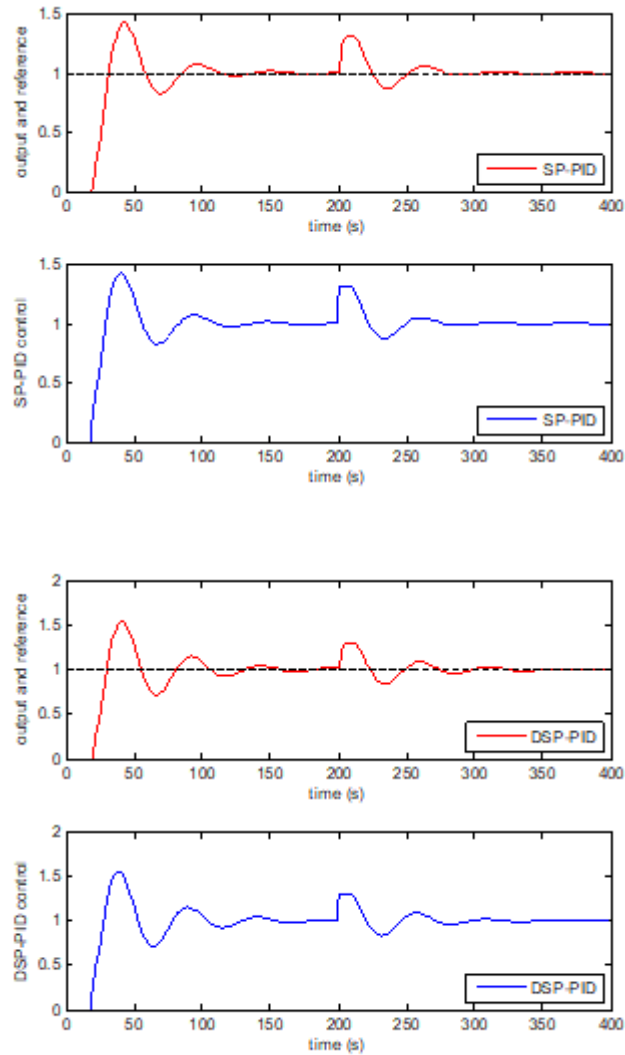
$$P_{m3}(s) = \frac{e^{-10s}}{(s+1)(0.6s+1)} \quad (24)$$

The closed-loop performance is to have a settling time similar to the open-loop process without overshoot and to reject the disturbance in steady-state conditions. For this simulation, three discrete control designs are considered. The first and second control algorithms use the FSP-PID design with and without the filter $F(z)$. The third, as described in [15], is based on the Dahlin PID Smith Predictor (DSP). According to the discrete PID tuning the parameters related to the equation (2) (coefficients of the polynomial $\beta(z^{-1})$), for this last control synthesis, are given by

$$\beta_0 = \gamma, \quad \beta_1 = \gamma a_1, \quad \beta_2 = \gamma a_2 \quad (25)$$

where $\gamma = \{1 - \exp(-T_s/\lambda)\}/B(1)$ and λ is the desired closed-loop time constant specify by the user (it is not practical to use a small value because will demand an aggressive control effort which can exceed the actuator saturation limits). The PID tuning gains of the Dahlin Smith predictor algorithm are $\theta_0 = 0.1856$, $\theta_1 = -0.1033$, $\theta_2 = 0.0129$, $\lambda = 10$ while for the FSP-PID are $K_c = 0.0387$, $T_i = 0.8148$, $T_d = 0.1663$, $T_f = 10$, $n = 1$, $T_s = 1$ s. Figure 4 shows the corresponding output and control responses for the system with dominant dead time. For both dynamic behavior, the FSP-PID design has a more adequate performance. The proposed control synthesis gives better setpoint tracking and disturbance rejection responses than the other PID design methods.





EXPERIMENTAL SIMULATION RESULTS

Experimental results are obtained by employing a heating tunnel process, laboratory scale equipment, assembled at the Department of Automation and Systems of the Federal University of Santa Catarina. The heating tunnel control apparatus, shown in Figure 5, is implemented with a fan, DC motor, 50 cm long air duct with uniform transverse area, having on its right extremity an electrical heating resistance. A power actuator circuit, whose input is compatible with a D/A data acquisition board, drives the electrical heating part. The temperature is measured via two sensors (LM35D) placed on the duct extremity. The fan spreads the hot air inside the duct and the control objective is to regulate the temperature inside the duct, by actuating on the current, through the electrical resistance without overshoot (closed-loop output dynamic). The volume of air flow is controlled by varying the speed of the fan. The practical system presents nonlinear characteristic, dead time, resonant and turbulent

behavior, so that it can be used as a tangible challenge for advanced control techniques in difficult situations.



Figure 5. Heating tunnel process used in the practical experiment.

A nonlinear model characterizes the heating tunnel so that a multi-model is employed in the plant-modeling task. The test data for a step response of the system and the estimated model, can be shown in Figure 6.

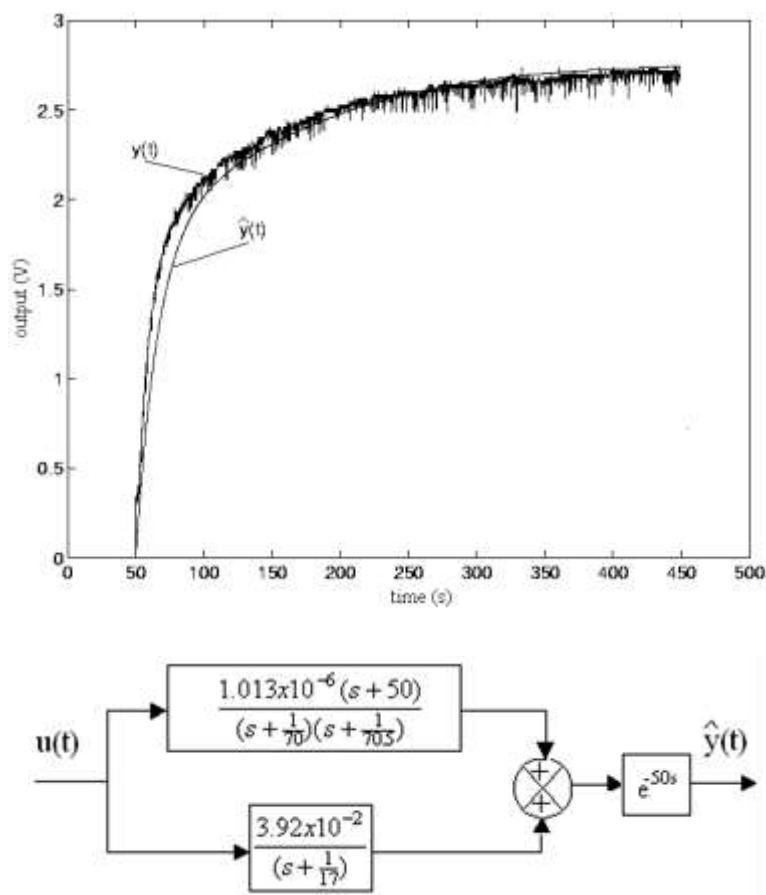


Figure 6. Open-loop responses and heating tunnel model.

The estimated model of the process can also be validated from the frequency response of the process. Figure 7 shows the Nyquist responses of the process and model and it is possible to observe that the estimated model provides a good approximation of the process.

For control comparison purposes, the parameters of the discrete PID controller of equation (2), tuned in [12], have been selected with the relay experiment obtaining $K_c = 0.5132$, $T_i = 34.21$, $T_d = 8.54$. The step response of the system, for tracking three setpoint changes, has been assessed as shown in Figure 8.

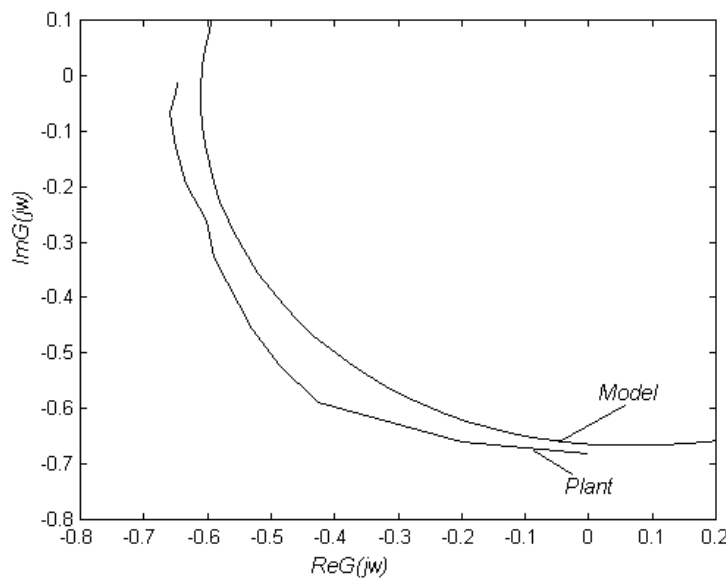


Figure 7. Plant (real) and model (estimated) Nyquist responses.

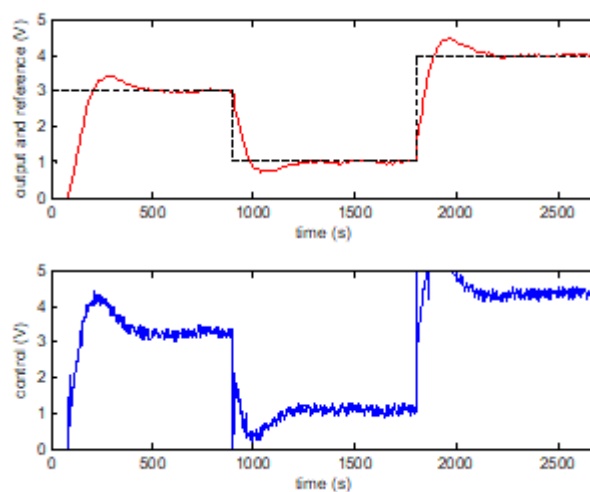


Figure 8. Step response of the experiment with PID tuned by relay test.

The loop performance is not achieved as specified before (in terms of overshoot and control effort energy) and the retuning discrete PID controller by the filtered Smith predictor design of this paper gives $K_c = 0.3218$, $T_i = 40.7529$, $T_d = 2.7397$, $T_f = 2.5$, $n = 2$, $T_s = 3$ s (see Figure 9). The closed-loop improvement obtained by using the discrete PID tuned by the Smith predictor with filter can be observed: well-damped setpoint response, small settling time, control behavior without saturation (smooth control magnitude) and less sensitive to noise.

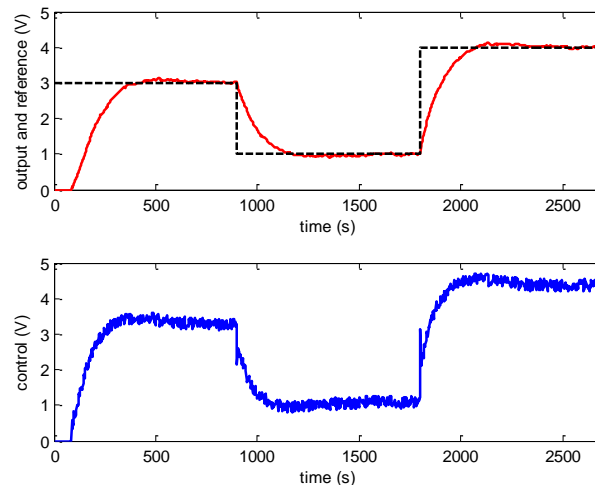


Figure 9. Step response of the experiment with PID tuned by FSP.

CONCLUSIONS

In this paper, the PID tuning design for the filtered Smith predictor compensator, in the discrete domain, was presented. PID tuning rules were developed by analytical way and were applied to stabilize control loops. The effectiveness of the discrete PID tuning by the filtered Smith predictor, to deal with dominant dead time, was assessed and compared in numerical and experimental simulations. The FSP-PID controller has provided good closed-loop performance for dominant dead time plants. More examples and robustness studies of the proposed PID tuning method must be investigated to establish a better conclusive comparison and performance of the FSP-PID control technique. PID settings based on discrete filtered Smith predictor, shown in this paper, can be embedded by means of standard control instrumentation as PLC or microcontroller as an industrial practice. Future works will focus on performance indices, stability and robustness analysis in systems with complex dynamics.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by UFSC and UTFPR. We would like to express our thanks to Professor Antonio Visioli from the University of Brescia (Italy) for the useful suggestions.

REFERENCES

1. A. O'Dwyer, "A Reference Guide to Smith Predictor Based Methods for the Compensation of Dead Time Process", Proc. of the IEE Irish Signals and Systems Conference, 2005, pp. 231-238.
2. A. Vodencarevic, "Design of PLC-Based Smith Predictor for Controlling Process with Long Dead Time", International MultiConference of Eng. and Comp. Scientists, 2010, vol. 2, pp. 1-6.
3. B. C. Torrico and J. E. N. Rico, "2DOF Discrete Dead Time Compensators for Stable and Integrative Processes with Dead Time", Journal of Process Control, 2005, vol. 15, pp. 341-352.
4. B. Roffel and B. H. L. Betlem, "Advanced Practical Process Control", Springer, 2004.
5. C. C. Hang; H. L. Tong and K. H. Weng, "Adaptive Control", Instrument Society of America, 1993.
6. I. Chien, "IMC-PID Controller Design - An Extension", IFAC Adaptive Control Chemical Processes Conference, 1988, pp. 147-152.
7. I. Kaya, "IMC based Automatic Tuning Method for PID Controllers in a Smith Predictor Configuration", Computers and Chemical Engineering, 2004, vol. 28, pp. 281-290.
8. J. P. Richard, "Time Delay System: An Overview of Some Recent Advances and Open Problems", Automatica, vol. 39, pp. 1667-1694.
9. M. S. Fadali and A. Visioli, "Digital Control Engineering: Analysis and Design", Elsevier, 2009.
10. M. Zhang, "A Robust Automatic Tuning for Process with Dominant Dead Time", 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007, pp. 180-183.
11. O. J. M. Smith, "A Controller to Overcome Dead Time", ISA Journal, 1959, vol. 6, pp. 28-33.
12. O. M. Almeida and A. A. R. Coelho, "Robust Tuning of a Dead Time Compensator", 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, vol. 1, pp. 741-745.
13. R. Matusu and R. Prokop, "Implementation of Modified Smith Predictors into a Matlab Program", 25th European Conference on Modelling and Simulation, 2011, pp. 1-6.
14. R. P. Sree; M. N. Srinivas and M. Chidambaram, "A Simple Method of Tuning PID Controllers for Stable and Unstable FOPDT Systems", Computers and Chemical Engineering, 2004, vol. 28, pp. 2201-2218.
15. V. Bobál; P. Chalupa; P. Dostál and M. Brázdil, "Digital Self-Tuning Smith Predictor Based on Pole Assignment Approach", 18th International Conference on Process Control, 2011, pp. 557-564.

16. V. L. Knih; A. A. Franca; A. S. Silveira; F. J. Gomes and A. A. R. Coelho, "Application of the IMC Tuning to the PID Controller in Nonlinear Systems using ScicosLab Simulator ", 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2010, pp. 1-6.
17. Z. Palmor and Y. Haveli, "Robustness Properties of Sampled-Data Systems with Dead Time Compensators", Automatica, 1990, vol. 26, pp. 637-64.

Capítulo 6



10.37423/220706302

CRIAÇÃO DE UM PROGRAMA EM MATLAB PARA A DETERMINAÇÃO DO MODELO L DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Daniel Jonathas da Costa Pereira

*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*

Gabriel Queiroz Pereira

*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*

Jornando Prado de Oliveira Santos

*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*

Rone Oliveira Brito

*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*

Samuel Porto da Silva

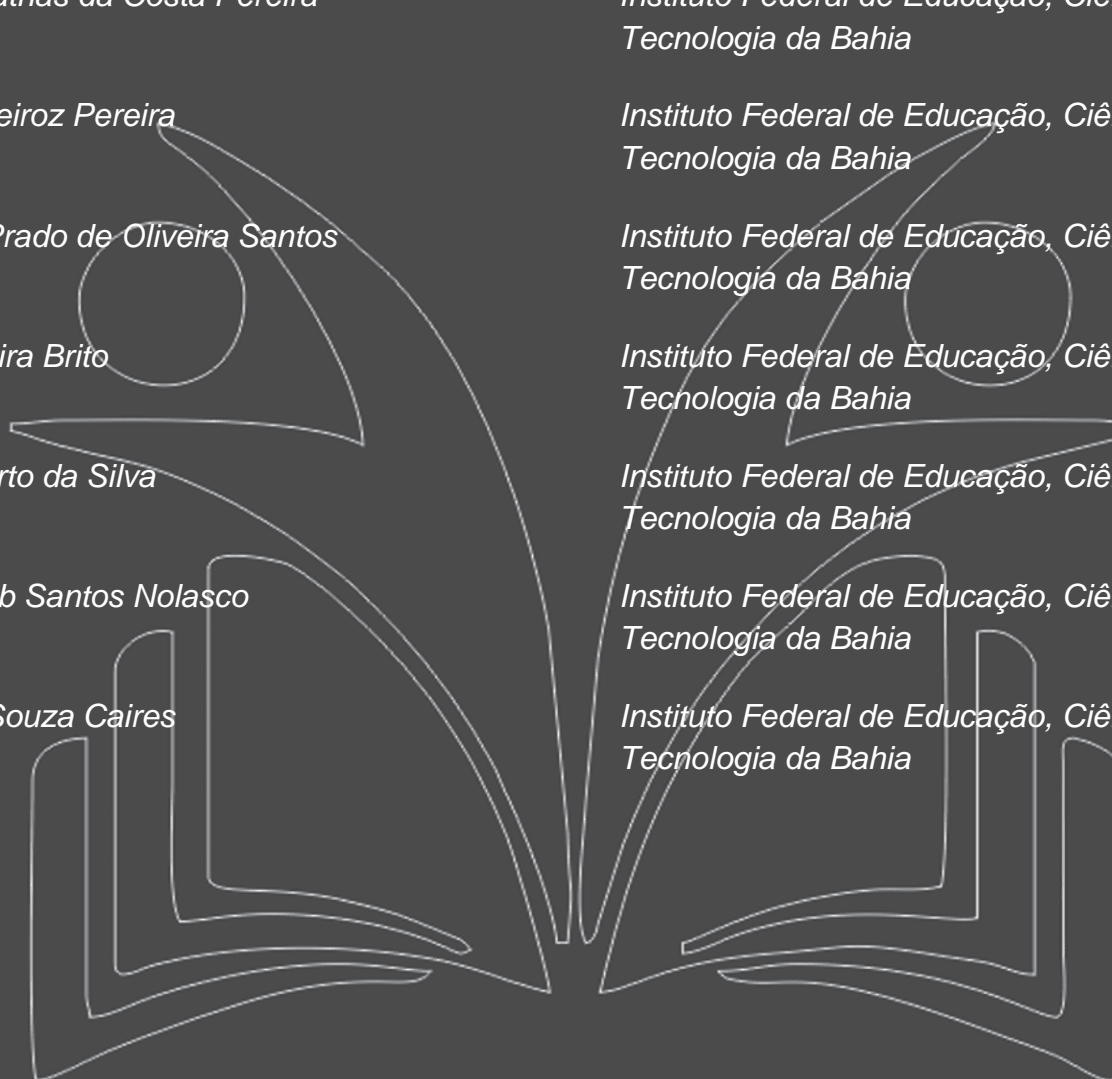
*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*

Diego Habib Santos Nolasco

*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*

Leonardo Souza Caires

*Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Bahia*



Resumo: O presente artigo apresenta o desenvolvimento teórico, o processo de construção e os resultados obtidos em um programa para a determinação do modelo L de transformadores monofásicos. O programa foi construído como um dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Conversão Eletromecânica, referente ao 6º semestre do curso de Engenharia Elétrica do IFBA – Campus Vitória da Conquista. A programação da ferramenta foi realizada mediante a utilização do software MATLAB, em que foi utilizado o ambiente interativo GUIDE para a criação manual de uma interface gráfica do usuário (GUI – Graphical User Interface) de forma rápida e simples por meio do paradigma da programação orientada a eventos. O programa calcula as resistências e reatâncias equivalentes do modelo L de um transformador monofásico referido ao lado de alta, a partir dos dados dos ensaios de curto-circuito e circuito aberto informados pelo usuário. O programa desenvolvido apresentou bom funcionamento nos testes realizados.

Palavras-Chave: Transformador monofásico, modelo L, interfaces gráficas.

I. INTRODUÇÃO

No que cerne ao avanço da sociedade ao longo do tempo, as aplicabilidades tecnológicas tem sido, indubitavelmente, alguns dos mais importantes recursos utilizados para facilitar e aperfeiçoar as formas de produção para atender as mais diversas demandas globais. Nesse âmbito, a extensa gama de máquinas com altas capacidades de processamento e de softwares cada vez mais complexos têm revelado o grande poder tecnológico que esses instrumentos têm agregado á uma extensa gama de áreas, essencialmente `a pesquisa científica.

Em se tratando da funcionalidade e das inovações tecnológicas, o software MATLAB é de grande notoriedade.

Essa ferramenta, também conhecida como Matrix Laboratory, é um programa interativo voltado para a computação numérica e a visualização de alto desempenho, muito utilizado na resolução de problemas de otimização, na manipulação de cálculos algébricos, no processamento de sinais e sistemas, na simulação de sistemas dinâmicos, entre outras funções.

O ambiente GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) do MATLAB, por exemplo, que que foi utilizado para a elaboração desse trabalho, exemplifica um dos muitos recursos do software, o qual permite a criação manual de uma interface gráfica que possibilita a interação entre o usuário e o computador por meio de elementos como botões e menus, de forma rápida e intuitiva.

Ainda relacionado á inovação tecnológica, ao que remete a um período mais longínquo ao dos softwares atuais, o transformador, datado de 1885 por William Stanley, mostrouse revolucionário no processo de distribuição de energia, a qual, até então, era restrita a pequenas distâncias devido às grandes perdas energéticas em detrimento das elevadas correntes utilizadas para compensar as baixas tensões no processo de transmissão.

Nesse aspecto, a principal função do transformador consiste em alterar o valor da tensão e da corrente elétrica, elevando-as ou diminuindo-as. Para que funcione, é necessário que um campo magnético oscilante, gerado por uma corrente alternada, seja produzido no enrolamento primário do transformador, o qual induzirá um campo magnético variável no enrolamento secundário e, por consequência, uma tensão elétrica induzida.

Destarte, em concordância com os temas abordados, o presente trabalho busca correlacioná-los ao desenvolver um programa para a determinação do modelo L equivalente para um transformador monofásico no ambiente GUIDE do MATLAB.

II. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A. O Modelo L do Transformador

Um transformador é um dispositivo que se utiliza do acoplamento magnético entre dois enrolamentos para transformar níveis de tensão e corrente, mantendo a potência constante.

A Figura 1 apresenta o esquema de um transformador monofásico. O núcleo de um transformador é composto de material ferromagnético. É desejável que o núcleo possua elevada permeabilidade magnética, para minimizar as perdas e fortalecer o acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário. Os enrolamentos são construídos de materiais condutores, sendo os mais comuns cobre e alumínio.

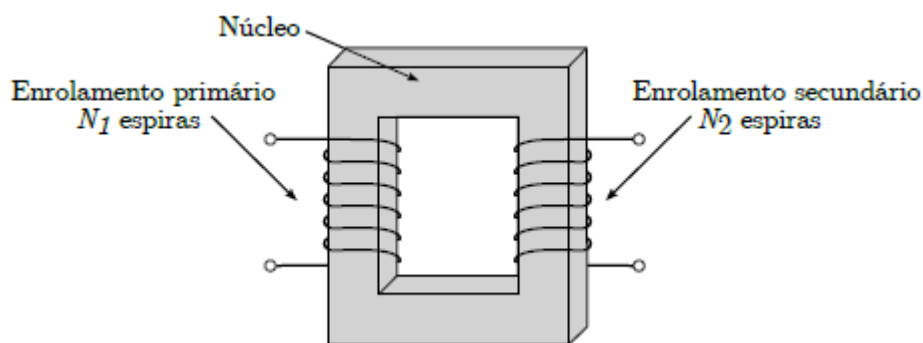


FIGURA 1. Esquema de um transformador monofásico.

Na Figura 2 um transformador ideal - em que não existem perdas - está representado com o secundário em aberto e uma fonte de tensão v_1 conectada ao enrolamento primário. Uma corrente de intensidade i_1 passa a circular no enrolamento primário, devido à fonte de tensão v_1 . Pela Lei de Ampère sabe-se que, quando uma corrente elétrica circula em um condutor, há o surgimento de um campo magnético em volta do condutor. Assim, a corrente i_1 dá origem a um campo magnético no núcleo do transformador.

O fluxo magnético resultante φ passa a circular pelo caminho fechado formado pelo núcleo. O fluxo magnético que concatena as bobinas do enrolamento primário é chamado de fluxo concatenado do enrolamento primário, sendo sua magnitude dada por (1).

$$\lambda_1 = N_1 \varphi \quad (1)$$

em que:

λ_1 é o fluxo concatenado do enrolamento primário;

N_1 é o número de espiras do enrolamento primário;

φ é o fluxo magnético no núcleo.

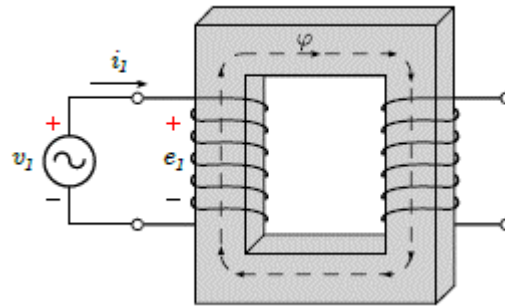


FIGURA 2. Transformador ideal a vazio.

Pela Lei de Faraday sabe-se que, quando um condutor está imerso em um campo magnético variável no tempo, o campo magnético induz no condutor uma força eletromotriz (fem). Assim, o fluxo que concatena o enrolamento primário induz nele uma fem e_1 , sendo sua magnitude dada por (2).

A fem induzida e_1 é mais comumente denominada força contra eletromotriz (fcm).

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

Assim, um transformador só funcionará se o fluxo concatenado do enrolamento primário for variante no tempo. Para isso, a fonte de tensão v_1 deve ser necessariamente uma fonte de corrente alternada. À vista disso, a partir desse ponto será adotada a notação fasorial no domínio da frequência (V_1) em lugar da notação no domínio do tempo (v_1) para as tensões e correntes.

A fim de representar matematicamente o comportamento de um transformador real, pode-se recorrer aos chamados circuitos equivalentes. Um circuito equivalente possui o objetivo de representar de forma simples o comportamento de um fenômeno físico real. Sendo assim, uma maneira de aprimorar a representação do comportamento do transformador apresentado na Figura 2 é considerar a resistência dos condutores que compõem o enrolamento primário. Essa resistência é adicionada ao circuito e é representada por R_1 na Figura 3.

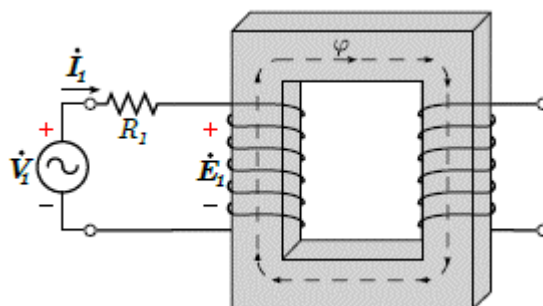


FIGURA 3. Circuito equivalente do transformador monofásico, levando em consideração as perdas ôhmicas no enrolamento primário.

Analisando o circuito do primário apresentado na Figura 1, é possível constatar que, juntas, a queda de tensão na resistência R_1 e a fcm induzida devem se igualar à tensão V_1 . Com isso,

$$\dot{V}_1 = R_1 \dot{I}_1 + \dot{E}_1 \quad (3)$$

Em transformadores reais, a queda de tensão na resistência R_1 é bem pequena quando comparada à fcm \dot{E}_1 . Assim, a magnitude da fcm \dot{E}_1 pode ser considerada como aproximadamente igual à tensão V_1 para a maior parte das aplicações de transformadores. A corrente \dot{I}_1 que circula no transformador quando em vazio, conforme apresentado na Figura 2, é denominada corrente de excitação, pois tem apenas a função de estabelecer e manter o fluxo magnético no núcleo do transformador. Quando analisada utilizando as técnicas de análise de Fourier, verifica-se que ela é formada por uma componente fundamental com a mesma frequência da fonte de tensão \dot{V}_1 e uma série de harmônicas ímpares.

A corrente de excitação é representada por \dot{I}_φ e pode ser decomposta em duas parcelas: uma em fase com a fcm .

E_1 e uma atrasada em 90° . A componente em fase com a fcm reflete as perdas no núcleo devido a correntes parasitas e ao fenômeno de histerese magnética, e é denominada corrente de perdas no núcleo, sendo representada por \dot{I}_c . A componente atrasada em 90° com relação à fcm induzida é denominada corrente de magnetização. Essa última está em fase com o fluxo magnético no núcleo e é representada por \dot{I}_m . A corrente de magnetização, como o próprio nome indica, reflete as perdas de magnetização do transformador.

A Figura 4 apresenta um diagrama fasorial em que é indicada a diferença de fase existente entre a corrente de excitação e a fem. \dot{E}_1 , representada por θ_c .

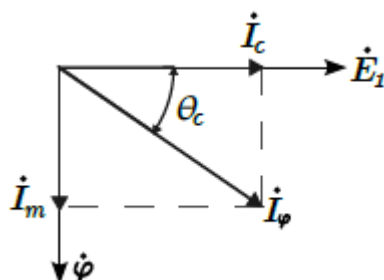


FIGURA 4. Diagrama fasorial da corrente de excitação.

Assim, uma forma de representar um transformador levando em consideração as perdas por excitação é apresentada na Figura 5. Nela, é adicionado um ramo em paralelo com o enrolamento primário do transformador em que são definidas uma resistência de perdas no núcleo R_c e uma indutância de magnetização L_m , cuja reatância, denominada reatância de magnetização, é representada por X_m . A corrente total no ramo representa a corrente de excitação, a corrente em R_c representa a corrente de perdas no núcleo e a corrente em X_m representa a corrente de magnetização. A partir daqui o núcleo passa a ser considerado ideal, visto que R_c e X_m representam as perdas reais do núcleo.

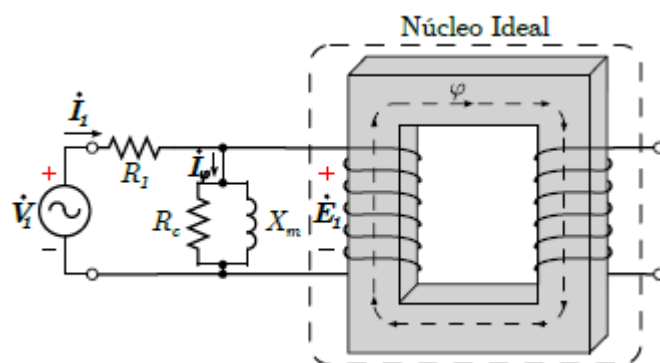


FIGURA 5. Circuito equivalente do transformador monofásico, levando em consideração a corrente de excitação e as perdas ôhmicas no primário.

Quando um transformador está em funcionamento, nem toda a energia transformada em campo magnético pelo enrolamento primário fica confinada na forma de fluxo magnético no núcleo. Uma parte da energia é dissipada na forma de um fluxo disperso. O fluxo disperso no primário do transformador induz uma tensão que é somada à tensão produzida pelo fluxo mútuo no primário e no secundário, mas que não é transferida para o secundário do transformador através do fluxo no núcleo, representando uma energia que fica circulando no enrolamento primário do transformador. Assim, a

parcela de perdas devido ao fluxo disperso no enrolamento primário do transformador pode ser representada como uma indutância de dispersão do primário, representada por L_1 , cuja reatância, a reatância de dispersão do primário, é representada por X_1 . A reatância de dispersão do primário pode ser adicionada ao circuito equivalente da Figura 5, formando o circuito equivalente apresentado na Figura 6.

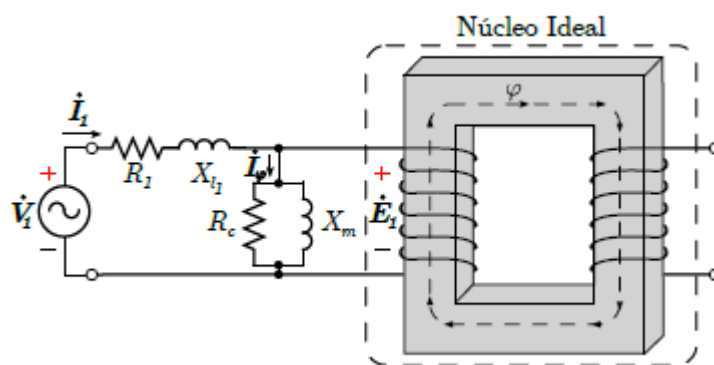


FIGURA 6. Circuito equivalente do transformador monofásico, levando em consideração a corrente de excitação e as perdas no primário.

O fluxo no núcleo também concatena as bobinas do enrolamento secundário, induzindo nelas uma fem e_2 , que dá origem a uma tensão v_2 nos terminais do enrolamento secundário. A magnitude da fem induzida é dada por (4).

$$e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

em que:

λ_2 é o fluxo concatenado do enrolamento secundário;

N_2 é o número de espiras do enrolamento secundário.

Quando uma carga é conectada aos terminais do secundário, uma corrente I_2 passa a circular por ele. Pela Lei de Ampère, sabe-se que a corrente de carga I_2 estabelecerá um fluxo magnético no núcleo do transformador, que irá se opor ao fluxo gerado pela fonte de tensão V_1 . Como toda a energia do circuito provém da fonte V_1 e a força magneto motriz resultante deve ser igual a zero, a corrente I_1 no Primário aumenta para compensar a oposição gerada pelo fluxo magnético proveniente da fem

\dot{E}_2 . Porém, semelhante ao que acontece com o fluxo magnético do enrolamento primário, uma parte do fluxo do secundário é perdida na forma de um fluxo disperso. Essa parcela de perdas para o enrolamento secundário é representada como uma indutância de dispersão do secundário, representada por L_2 , cuja reatância X_2 é denominada reatância de dispersão do Secundário. Além disso, os enrolamentos do secundário do transformador também possuem uma resistência, que é representada por R_2 . O circuito equivalente do transformador, considerando o efeito do secundário, é então apresentado na Figura 7.

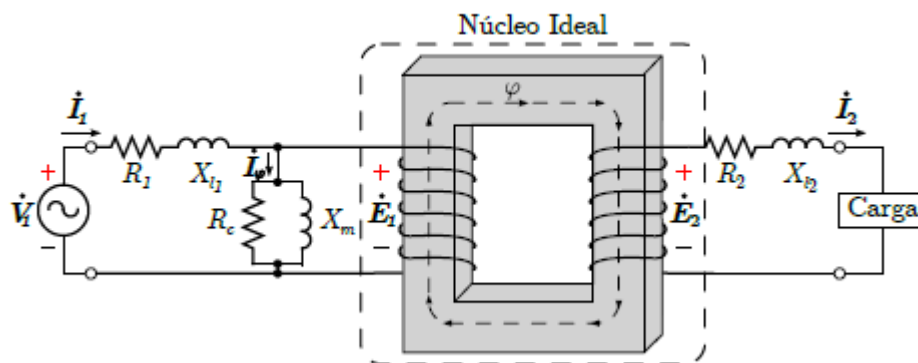


FIGURA 7. Circuito equivalente do transformador monofásico, levando em consideração a corrente de excitação e as perdas nos enrolamentos.

As impedâncias podem ser “refletidas” de um lado para outro do transformador se forem multiplicadas pelo quadrado da relação de transformação, processo indicado em (5).

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (5a)$$

em que:

Z_2 é a impedância a ser refletida para o primário;

Z_2 é a impedância Z_2 refletida para o primário.

O processo de reflexão de impedâncias pode ser utilizado para representar as resistências e reatâncias do modelo do transformador em apenas um de seus lados. Assim, é possível obter o modelo equivalente do transformador com relação aos terminais do enrolamento primário refletindo a resistência R_2 e a reatância X_2 para o lado primário do transformador utilizando o processo apresentado em (5).

Com isso, é possível obter o modelo T do transformador monofásico, apresentado na Figura 8. O transformador pode ser retirado do circuito porque a impedância do secundário foi refletida para o lado primário do transformador.

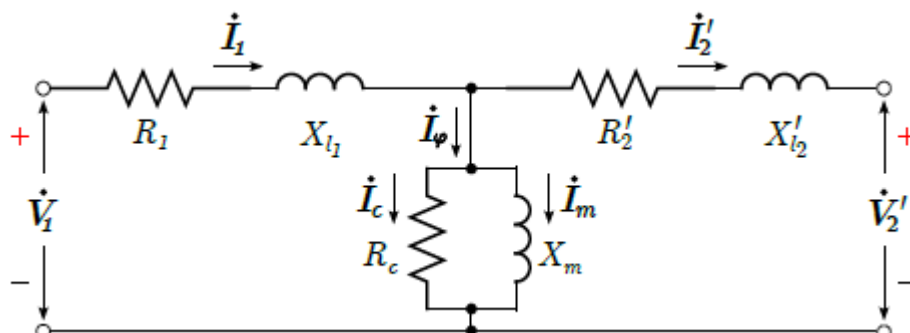


FIGURA 8. Modelo T do transformador monofásico.

Em transformadores reais, a impedância do ramo de magnetização, na maioria das vezes, é muito maior do que a impedância do secundário refletida (Z'_2). Desse modo, é possível deslocar o ramo de magnetização do modelo

T apresentado na Figura 8. Essa aproximação não acarreta em um aumento considerável de erro na maioria dos transformadores, e dá origem ao chamado modelo L do transformador monofásico, muito utilizado na análise prática dos transformadores. O modelo L é apresentado na Figura 9.

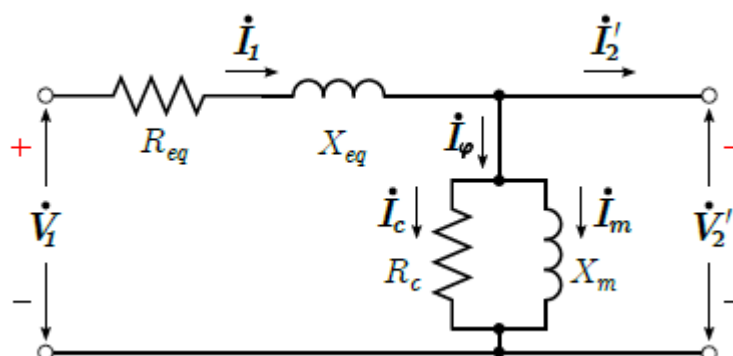


FIGURA 9. Modelo L do transformador monofásico.

B. Ensaios de Curto-Circuito e de Circuito Aberto

Uma forma de determinar o valor dos parâmetros do modelo L de um transformador real é realizando os ensaios de curto-circuito e de circuito aberto.

No ensaio de curto-circuito de um transformador, é inserido um curto-circuito em um de seus lados, enquanto que o outro lado é conectado a uma fonte de tensão. Varia-se a magnitude da fonte de tensão até que a corrente seja igual à corrente nominal calculada para o transformador.

Como o ensaio deve ser realizado na corrente nominal para que o resultado obtido seja o mais próximo possível das perdas reais do transformador, o ensaio de curto-circuito é normalmente realizado no lado de maior tensão do transformador, por possuir uma menor corrente nominal. Ademais, os valores das variáveis encontradas após o ensaio estarão, portanto, refletidos para o lado de alta tensão. Durante a realização do ensaio de curto-circuito, são medidas a tensão na fonte, a corrente entregue pela fonte ao circuito e a potência dissipada.

Quando um curto-circuito é adicionado ao secundário do modelo L do transformador, o ramo da corrente de excitação fica em paralelo com o curto-circuito. Com isso, nenhuma corrente circula pelo ramo de excitação, e os dados obtidos mediante a realização do ensaio podem ser utilizados para determinar o valor da resistência equivalente dos enrolamentos (R_{eq}) e da reatância equivalente de dispersão dos enrolamentos (X_{eq}), calculadas mediante a utilização das expressões apresentadas em (6).

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (6a)$$

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (6b)$$

$$X_{eq} = \sqrt{|Z_{eq}|^2 - R_{eq}^2} \quad (6c)$$

No ensaio de circuito aberto de um transformador, uma fonte de tensão é inserida em um de seus lados, enquanto que o outro lado é deixado em aberto. A fonte de tensão é ajustada para o valor de tensão nominal do lado em que o ensaio está sendo realizado. Como o ensaio deve ser realizado na tensão nominal para que o resultado obtido seja o mais próximo possível das perdas reais do transformador, o ensaio de circuito aberto é normalmente realizado no lado de menor tensão do transformador. Ademais, os valores das variáveis encontradas após o ensaio estarão, portanto, refletidos para o lado de baixa tensão. Durante a realização do ensaio de circuito aberto, são medidas a tensão na fonte, a corrente entregue pela fonte ao circuito e a potência dissipada.

Quando uma fonte de tensão é conectada ao secundário do modelo L do transformador, uma corrente passa a circular no secundário do transformador. Como o primário está em aberto, nenhuma corrente circula pela resistência equivalente.

Com isso, os dados obtidos mediante a realização do ensaio podem ser utilizados para determinar o valor da resistência do núcleo (R_c) e da reatância de magnetização (X_m), calculadas mediante a utilização das expressões apresentadas em (7).

$$|Z_\phi| = \frac{V_0}{I_0} \quad (7a)$$

$$R_c = \frac{V_0^2}{P_0} \quad (7b)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{|Z_\phi|^2} - \frac{1}{R_c^2}}} \quad (7c)$$

III. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA NO MATLAB

Foi utilizado o ambiente GUIDE no software MATLAB para desenvolver o programa. A interface do usuário final criada permite ao usuário, por meio de elementos gráficos, botões e menus, obter os parâmetros do modelo L de um transformador monofásico. A Tabela 1 descreve todos os parâmetros necessários para o cálculo do modelo L. Esses parâmetros podem ser obtidos a partir da placa do transformador e dos ensaios de curto-circuito e circuito aberto realizados.

TABELA 1. Parâmetros necessários para a realização do cálculo no MATLAB.

Descrição	Parâmetros
Potência Nominal	S_n
Tensão do Lado de Alta	AT
Tensão do Lado de Baixa	BT
Frequência	f
Corrente de Curto-Circuito	I_{cc}
Tensão de Curto-Circuito	V_{cc}
Potência de Curto-Circuito	P_{cc}
Corrente de Circuito Aberto	I_{ca}
Tensão de Circuito Aberto	V_{ca}
Potência de de Circuito Aberto	P_{ca}

Foi criado um ambiente GUIDE no MATLAB. A Figura 10 apresenta a imagem do primeiro menu interativo. Nesse menu, o usuário deve inserir os seguintes parâmetros do transformador: Potência

nominal (S_n), tensão do lado de alta (AT), tensão do lado de baixa (BT), frequência da rede (f) e os valores de potência, tensão e corrente medidos nos ensaios de curto-circuito e circuito aberto. Para receber esses valores foram utilizados static texts. Existem também, no primeiro menu, informações como título da janela, descrição da sua função, nome das variáveis e suas respectivas unidades de medida. Por fim, foram colocados dois push-buttons, um para passar para a próxima etapa e outro para finalizar a simulação.



FIGURA 10. Imagem do primeiro menu do GUIDE.

E necessário declarar uma variável para cada static text em branco para receber os valores informados pelo usuário.

A Figura 11 apresenta o código para uma variável. O código para as outras é similar.

```
1 Sn=str2double(get(hObject,'String'))
2 setappdata(0,'Sn',Sn)
```

FIGURA 11. Código para declarar uma variável.

A Figura 12 apresenta o código utilizado no push-button “Fechar”, que tem a função de fechar o primeiro menu.

```
1 % --- Executado quando o pushbutton2 é pressionado
2
3 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata,
    handles)
4 clear all;
5 clc;
6 close (Modelagem_de_transformador);
```

FIGURA 12. Código do push-button “Fechar”.

Para a função do push-button “Continuar” foi elaborado o código apresentado na Figura 13. No início do código foi feito um tratamento das variáveis que receberam os valores informados pelo usuário (linhas 4 a 15). Logo depois é utilizado o comando if para realizar uma comparação lógica, sendo que, caso algum dos campos não seja preenchido pelo usuário, o programa irá exibir uma mensagem informando que o usuário deve preencher todos os campos (linhas 17 e 18). Após isso, foi utilizado o comando elseif no intuito de realizar uma comparação lógica para verificar se os valores são menores ou iguais a zero. Se essa condição for atendida, retorna uma mensagem informando que o usuário deve informar somente valores maiores do que zero (linhas 19 e 20). Caso nem o if nem o elseif sejam atendidos, o programa fecha a GUIDE 1 (linha 23) e passa para próxima etapa (linha 24).

```

1  § — Executado quando o pushbutton1 é pressionado
2
3  function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata,
    handles)
4  Sn1=str2double(get(handles.Sn,'string'));
5  AT1=str2double(get(handles.AT,'string'));
6  BT1=str2double(get(handles.BT,'string'));
7  f1=str2double(get(handles.f,'string'));
8
9  Pca1=str2double(get(handles.Pca,'string'));
10 Vca1=str2double(get(handles.Vca,'string'));
11 Ica1=str2double(get(handles.Ica,'string'));
12
13 Pcc1=str2double(get(handles.Pcc,'string'));
14 Vcc1=str2double(get(handles.Vcc,'string'));
15 Icc1=str2double(get(handles.Icc,'string'));
16
17 if(isnan(Sn1)|| isnan(AT1)|| isnan(BT1)|| isnan(f1)||
    isnan(Pca1)|| isnan(Vca1)|| isnan(Ica1)|| isnan(
    Pcc1)|| isnan(Vcc1)|| isnan(Icc1))
18     msgbox('Por favor, digite todos os valores numé
        ricos nos campos!');
19 elseif(Sn1<=0||AT1<=0||BT1<=0||f1<=0||Pca1<=0||Vca1
    <=0||Ica1<=0||Pcc1<=0||Vcc1<=0||Icc1<=0)
20     errordlg('ERROR:Por favor, somente valores
        maiores que zero!')
21 else
22
23     close(Modelagem_de_transformador);
24     Imagem1;
25
26 end

```

FIGURA 13. Código para o push-button “Continuar”.

Para o segundo menu do ambiente interativo foi criado um novo GUIDE, em que foi necessária a utilização do comando axes para inserir a imagem do modelo L. Foram colocados três push-buttons: “Voltar” , “Calcular” e “Fechar” .

O primeiro tem a função de retornar para a etapa anterior, o primeiro menu. O segundo realiza os cálculos e exibe os resultados. Por fim, o terceiro tem a mesma função e programação do push-but “Fechar” do primeiro GUIDE.

O código do push-button “Voltar” é apresentado na Figura 14.

```

1 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata,
    handles)
2
3 close(Imagem1); % Fecha o guide atual (guide 2)
4 Modelagem_de_transformador; % Volta para o guide
    anterior (guide 1)

```

FIGURA 14. Código do push-button “Voltar”.

Para o push-button “Calcular” foi elaborado o código apresentado na Figura 15, em que são realizados os cálculos dos parâmetros do modelo L do transformador. Os valores calculados são referidos ao lado de alta do transformador.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Para demonstrar a utilização do programa desenvolvido, foram considerados os dados dos ensaios de curto-circuito e de circuito aberto apresentados na Tabela 2. Os dados de placa do transformador são apresentados na Tabela 3.

A tela inicial do programa desenvolvido com os dados inseridos é apresentada na Figura 16.

```

1  % --- Executado quando o pushbutton2 é pressionado
2
3  function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata,
      handles)
4  Sn=getappdata(0,'Sn');
5  AT=getappdata(0,'AT');
6  BT=getappdata(0,'BT');
7  f=getappdata(0,'f');
8
9  Pca=getappdata(0,'Pca');
10 Vca=getappdata(0,'Vca');
11 Ica=getappdata(0,'Ica');
12
13 Pcc=getappdata(0,'Pcc');
14 Vcc=getappdata(0,'Vcc');
15 Icc=getappdata(0,'Icc');
16
17 % ----- Cálculo das Correntes -----
18 ia=Sn/AT;
19 str2double(set(handles.Ia,'string',ia))
20 ib=Sn/BT;
21 str2double(set(handles.Ib,'string',ib))
22
23 % --- Cálculo da Relação de Transformação ---
24 a=AT/BT;
25
26 % ----- Resistências -----
27 req=Pcc/Icc^2;
28 str2double(set(handles.Req,'string',req))
29 xeq=((Vcc/Icc)^2-(req)^2)^(1/2);
30 str2double(set(handles.Xeq,'string',xeq))
31 rc=Vca^2/Pca;
32 xm=1/(((1/(Vca/Ica))^2-(1/rc)^2)^(1/2));
33 rcA=a^2*rc;
34 str2double(set(handles.RcA,'string',rcA))
35 xmag=a^2*xm;
36 str2double(set(handles.Xmag,'string',xmag))

```

FIGURA 15. Código do push-button “Calcular”, com o cálculo dos parâmetros do modelo L.

TABELA 2. Dados dos ensaios de Circuito Aberto e Curto-Circuito.

Parâmetro	Circuito aberto	Curto-circuito
Tensão (V)	240	489
Corrente (A)	7,133	2,5
Potência (W)	400	240

TABELA 3. Dados de placa do transformador.

Parâmetro	Valor
Potência (kVA)	20
Relação de transformação (V)	8000/240
Frequência (Hz)	60

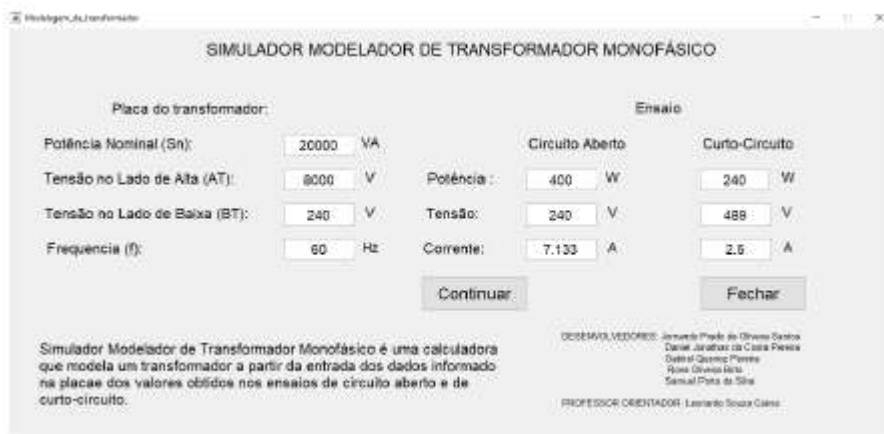


FIGURA 16. Print da tela inicial do programa, com os dados do ensaio inseridos.

Ao iniciar o programa, insere-se os dados nos espaços destinados para os dados do transformador e para os resultados obtidos nos ensaios de circuito aberto e de curto-circuito.

A próxima tela do programa contém os resultados calculados pelo programa desenvolvido:

$R'_c, X'_m, R_{eq}, X_{eq}$, como apresentado na Figura 17.

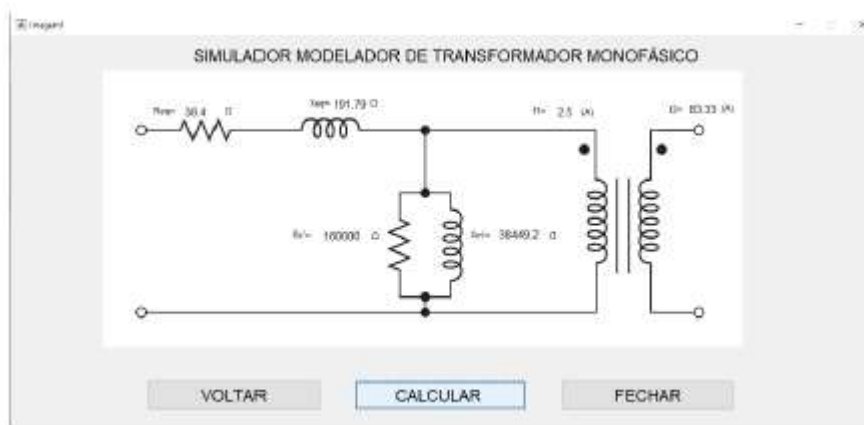


FIGURA 17. Print da tela final do programa, com o modelo L calculado para o transformador.

A Tabela 4 a seguir contém os resultados refletidos para o lado de alta do transformador encontrados através do programa criado.

TABELA 4. Resultados obtidos com o programa.

Parâmetro	Valor
R_c	160000 Ω
X_m	38449,2 Ω
R_{eq}	38,4 Ω
X_{eq}	191,79 Ω

V. CONCLUSÃO

O transformador monofásico é basicamente um dispositivo que, através do acoplamento magnético entre dois enrolamentos, permite a transformação dos níveis de tensão da rede. Quando considerado ideal, entrega na saída a mesma potência que recebeu nos seus terminais de entrada. Além disso, o transformador não tem resposta quando utilizado em corrente contínua (CC), pois a indução de tensão no secundário ocorre quando existe fluxo variável no núcleo.

Em algumas situações, quando necessário levantar informações de modelo de um transformador monofásico, são realizados os ensaios de curto-circuito e circuito aberto.

Esses ensaios permitem encontrar o modelo L do transformador refletido para o lado de alta ou de baixa do mesmo.

Dessa maneira, a aplicação do ambiente GUIDE no MATLAB permite que se levante de forma rápida e interativa, sem a necessidade de repetição manual de cálculos, os valores das grandezas desse modelo. Assim, o programa desenvolvido nesse trabalho surge como uma calculadora capaz de repetir esse processo para uma quantidade maior de transformadores monofásicos e apresenta os resultados em uma janela de imagem contendo o desenho do modelo L dos mesmos.

Ademais, para demonstrar o funcionamento do programa criado, o presente trabalho utilizou os dados das Tabelas 2 e 3 e obteve os valores da resistência equivalente dos enrolamentos (R_{eq}), da reatância de dispersão equivalente (X_{eq}), a resistência do núcleo (R_c) e a reatância de magnetização

(X_m) refletidos para o lado de alta. Parte do código utilizado para criação do programa foi apresentado. Todos os valores obtidos estão adequados com o esperado.

REFERÊNCIAS

- [1] CHAPMAN, S. J. Transformadores. Fundamentos de máquinas elétricas. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. p. 65-151.
- [2] Hayt Jr, William H.. Eletromagnetismo. 6ª Edição.
- [3] HELERBROCK, Rafael. Transformadores. Mundo Educação. Disponível em <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/transformadores.htm#>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- [4] UMANS, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p.
- [5] SANTOS, R.; FONSECA, C. N. O software matlab como auxílio didático – pedagógico. In: EREMAT - Encontro Regional de Estudantes de Matemática da Região Sul, 20., 2014, Bagé/RS. Anais [...] Fundação Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), 2014. P. 13-16. Disponível em: [https://eventos.unipampa.edu.br/eremat/files/2014/12/MC SANTOS 01667366009.pdf](https://eventos.unipampa.edu.br/eremat/files/2014/12/MC_SANTOS_01667366009.pdf). Acesso em: 12 jul. 2022.

Capítulo 7

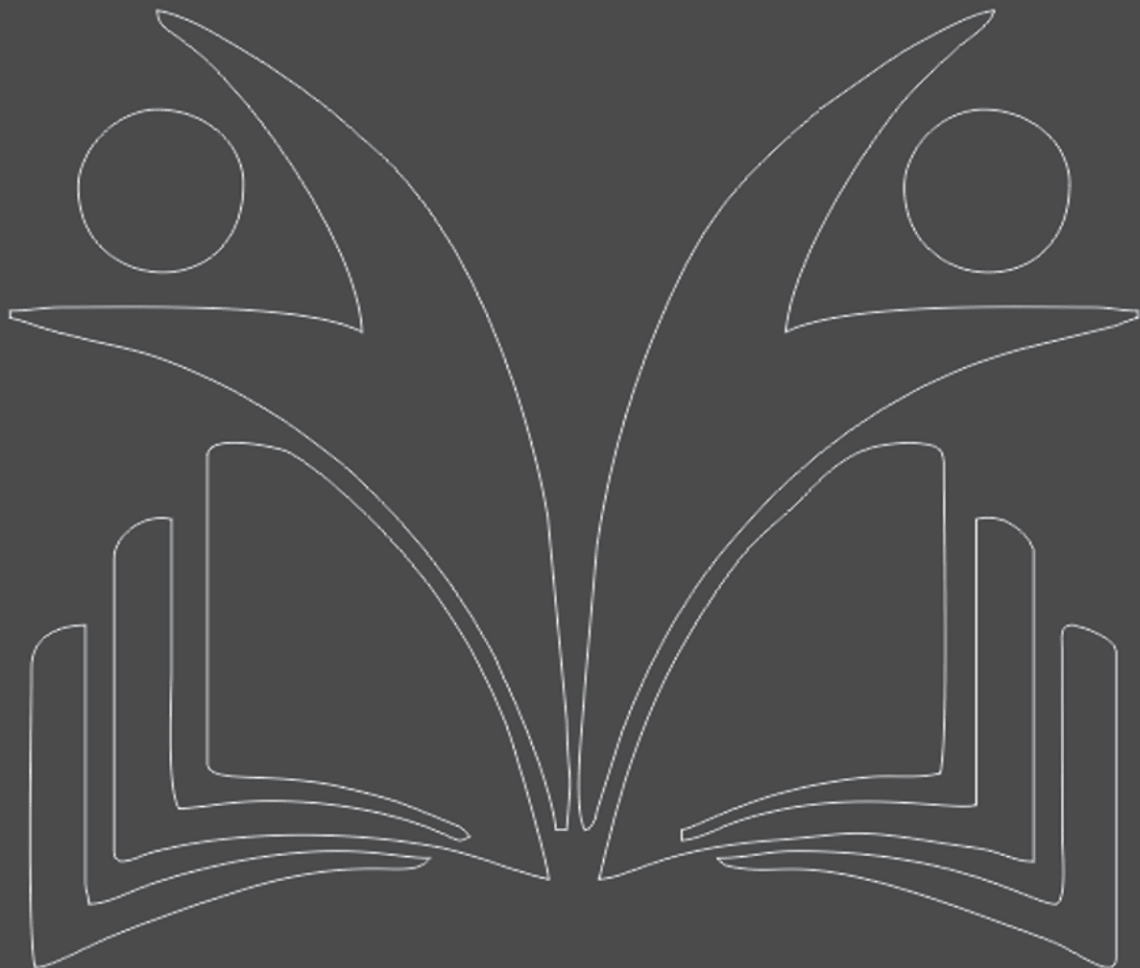


10.37423/220706305

ESTUDOS DE DEGADAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DO SUBSISTEMA DE CONTROLE TÉRMICO DE SATÉLITES

Marcos Galante Boato

Centro Paula Souza



Resumo: Em um ambiente de alto-vácuo, alguns materiais que compõe o satélite “degaseificam”. Tais vapores ou contaminantes acabam depositando-se nas superfícies de controle térmico que somados a ação da radiação ultravioleta, escurecem e modificam as propriedades termo-ópticas. O objetivo desta pesquisa foi verificar experimentalmente a ação da radiação ultravioleta nos aspectos físicos do escurecimento das superfícies do *Optical Solar Reflector (OSR)*, utilizados como ferramenta para controle térmico de satélites. Além disso, o estudo a realção entre a temperatura da superfície do OSR e a permanência da camada de contaminante depositada.

Palavras-chave: Fotoquímico; degradação; Refletor Solar Óptico.

INTRODUÇÃO

Satélites artificiais são equipamentos enviados para o espaço a fim de executar uma determinada missão, seja: estudos meteorológicos, telecomunicações, coleta de dados para estudos científicos e etc. No ambiente espacial o satélite fica exposto a condições extremas como à radiação solar, às radiações que provém da Terra (radiação terrestre, e o albedo que é a radiação do Sol refletida pela Terra) e um forte sumidouro que é o espaço profundo, cuja temperatura de fundo é 4K. Portanto os satélites são protegidos de todas as cargas térmicas provenientes do espaço.

O satélite é dividido em diversos subsistemas como: controle térmico; controle de atitude; telemetria, telecomando, e controle; estrutura e mecanismos; gestão de bordo; e propulsão, assim para controlar essas variações de temperatura, o satélite se utiliza do subsistema de controle térmico, para manter os equipamentos em suas temperaturas adequadas.

Para proteger o satélite, o mesmo é revestido externamente com materiais de controle térmico a fim de isolá-los do meio externo. Devido à ausência do meio convectivo, as trocas térmicas entre o satélite e o ambiente espacial são exclusivamente por radiação. Um dos materiais comumente utilizados para revestir o satélite são as mantas de isolamento térmico (*Multi Layer Insulation – MLI*). Porém este revestimento não pode isolar completamente o satélite, pois o mesmo é composto por diversos equipamentos que, por efeito Joule, geram calor. Este calor eleva a temperatura interna, podendo chegar acima dos limites aceitáveis, sendo assim é necessário eliminar o excesso desse calor por meio de aberturas na manta. As aberturas funcionam como janelas térmicas, irradiando o calor dos equipamentos para o espaço. A figura 1.1 mostra o CBERS 2b com o MLI e as respectivas aberturas.

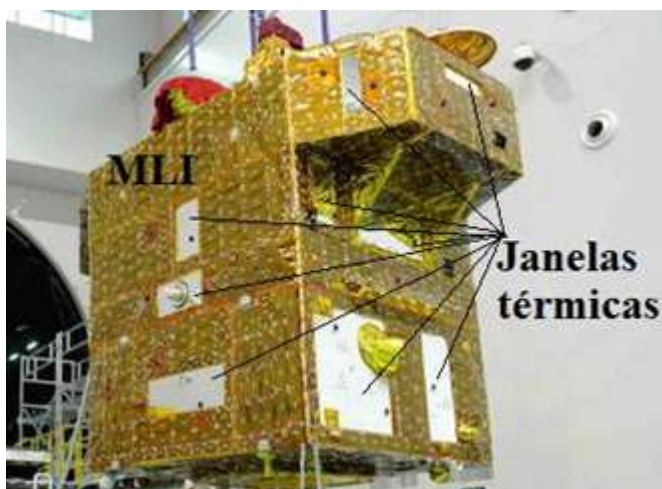


FIGURA 1 – CBERS 2b com janelas térmicas no MLI.

Como toda interação satélite-ambiente é por radiação, existe uma grande dependência da temperatura em função das propriedades térmicas do revestimento, e assim estas janelas térmicas, mais comumente conhecidas como radiadores, são revestidas com materiais que tenham boas propriedades de emissividade e absorvidade.

Para um revestimento de radiador ser considerado um bom material de controle térmico, o mesmo deve possuir uma alta emissividade no espectro do infravermelho (ϵ_{IR}) e baixa absorvidade no espectro solar (α_S), ou seja, uma baixa relação α_S/ϵ_{IR} .

Em controle térmico de satélites utiliza-se a seguinte convenção. A emissividade indica a propriedade no infravermelho e a absorvidade indica a propriedade no solar, ou seja, no infravermelho a superfície emite e absorve proporcionalmente ao ϵ_{IR} e no solar a superfície absorve proporcionalmente a α_S .

Existem alguns tipos de revestimentos que detêm uma baixa relação α_S/ϵ_{IR} adequado para uso em radiadores; sendo os mais comuns a tinta refletora, de cor branca, e o *Optical Solar Reflector* - OSR. Estes revestimentos atuam nas trocas de calor com o satélite e o ambiente espacial e também entre as partes do satélite. (BOATO, 2014)

Nos satélites integrados no Brasil, tem-se utilizado a tinta branca especial de menor custo com um baixo valor de α_S/ϵ_{IR} , porém há um aumento deste valor ao longo do tempo devido a degradação causado pelo ambiente espacial, e esta variação no valor de α_S/ϵ_{IR} causa um aumento na temperatura interna do satélite. Por causa dessa degradação os projetistas calculam um radiador maior para atender os casos quentes de final de vida, a fim de compensar essa perda da eficiência por degradação. Por consequência, no início de vida do satélite, as temperaturas são mais baixas, devido ao super dimensionamento do radiador, assim podendo ser necessário fazer o uso de aquecedores elétricos a fim de mantê-lo em temperaturas adequadas para o seu pleno funcionamento. No final da vida útil do satélite as temperaturas internas tende a elevar-se, e assim podendo causar problemas no funcionamento de sua carga útil.

Uma boa substituição da tinta é a utilização de OSR. Esse tipo de revestimento, um espelho de segunda superfície de alta qualidade termo óptica, apresenta uma desprezível degradação na relação α_S/ϵ_{IR} durante o tempo de exposição espacial. Desta forma, o radiador de OSR poderá ter seu tamanho reduzido comparado com o tamanho do refletor convencional de tinta branca e por fim diminuindo

eventuais dissipações necessárias em aquecedores para o caso do começo de vida. Essa diminuição da dissipação necessária reflete diretamente no consumo de energia elétrica do satélite.

O Refletor Solar Óptico (OSR) é basicamente um espelho de segunda superfície (uma lâmina de quartzo com uma fina camada de prata depositada no seu verso). São dispositivos utilizados em determinadas partes do satélite para a rejeição de calor para o meio espacial. Na maioria das vezes este radiador é composto por uma lâmina de borossilicato ou sílica fundida, retangular ou quadrada. (MARSHALL e BREUCH,1968)

O OSR não degrada suas propriedades de absorvidade solar e emissividade infravermelha no ataque de partículas de alta energia, radiação ultravioleta e outros elementos presentes no ambiente espacial. Porém, a degradação ocorre oriunda dos contaminantes provindos da “degaseificação” de orgânicos voláteis que são exauridos do satélite ou do foguete no estágio de posicionamento do satélite. (GILMORE, 1994) (MARSHALL e BREUCH,1968)

O mecanismo de degradação ainda não é bem conhecido, porém está comprovado que esse efeito causa o aumento de absorvidade solar nestes radiadores tipo espelho. O que se conhece é que os orgânicos voláteis, oriundos de “degaseificação”, se depositam na superfície do espelho. Esses contaminantes orgânicos, por efeito fotoquímico, acabam aderindo na superfície dos espelhos e assim deixando-os enegrecidos. O efeito do enegrecimento aumenta a opacidade, do vidro, para a banda da luz visível, fazendo com que ocorra o aumento na absorvidade solar⁵.

Estudos observaram que quanto mais a superfície estiver quente, menor será a taxa de deposição de orgânicos voláteis, amenizando assim a degradação. A figura 1 apresenta a espessura, em angstroms (Å), da camada contaminante depositada em relação à temperatura da superfície do satélite. (GILMORE, 1994) e(VILELA e GARCIA, 2014).

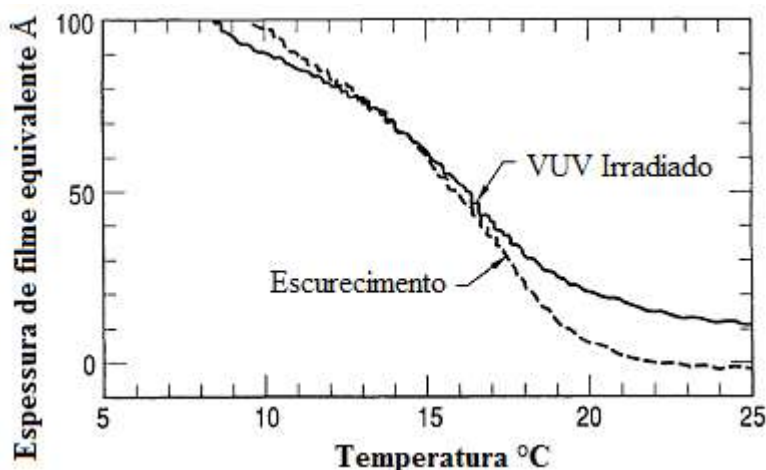


Figura 2: Espessura de filme de contaminante depositado versus temperatura da superfície do satélite (modificada de Stewart et al. 1990)

A fim de verificar o efeito da degradação devido ao processo fotoquímico de orgânicos voláteis depositados nas superfícies do satélite, foi elaborado um simples experimento para comprovar, *in situ*, o fenômeno demonstrado na figura 1. Para a simulação espacial prevista para o voo de um satélite foram utilizadas quatro lamínulas de OSR, sendo três delas previamente contaminadas com um agente orgânico antes do teste; estas foram individualmente aquecidas com um sistema independente de aquecedores elétricos e expostas à luz ultravioleta em vácuo. Antes do teste de degradação foi escolhida arbitrariamente a temperatura de cada lamínula contaminada. A tabela 1 mostra a temperatura imposta a cada OSR durante o experimento. (STEWART et al. 1990)

Tabela 1: Temperatura em cada OSR.

<i>Condição para cada OSR</i>	<i>Temperatura imposta [em °C]</i>
<i>1° OSR Contaminado</i>	<i>80±05</i>
<i>2° OSR Contaminado</i>	<i>50±05</i>
<i>3° OSR Contaminado</i>	<i>25±05</i>
<i>4° OSR Não contaminado</i>	<i>25±05</i>

O objetivo desse experimento foi verificar duas características:

- 1°. A influência do aumento da temperatura na diminuição da quantidade de contaminante na superfície do OSR;
- 2°. E a influência da exposição a radiação ultravioleta tipo C na mudança da absorvidade solar (α_s) no OSR devido à reação fotoquímica do contaminante.

APARATO EXPERIMENTAL

Para reproduzir o efeito da degradação dos OSR's em solo (simular o ambiente espacial) foi montado o experimento dentro de uma câmara de alto-vácuo com uma lâmpada de ultravioleta tipo C e um sistema de monitoramento da temperatura dos OSR's. Detalhadamente, foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais para compor o aparato experimental:

- Uma câmara de alto-vácuo com sistema de bombeamento primário mecânico seco e bombeamento secundário composto por bomba turbo molecular, no Laboratório Associado de Plasma do INPE;
- Dois aquecedores de película, conhecidos por *skin heaters*;
- Duas fontes de tensão da marca LAMBDA modelo GEN150-5;
- Seis lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa pressão da marca OSRAM com cada uma contendo 2,8W de potência luminosa na faixa de 200 à 280nm;
- Três termopares tipo "T";
- Equipamento de leituras dos termopares da marca Minipa;
- Porta amostra feito com chapas de alumínio com espessura de 2mm;
- Óleo de bomba difusora da marca Dow Corning DC-704 (componente químico tetrametiltetrafeniltrisiloxane).

No experimento, foram utilizadas quatro amostras de OSR's, sendo duas delas fixadas em um porta-amostra, e as outras duas fixadas separadamente em portas-amostras individuais. Também foram instalados os *skin heaters* e termopares nos portas-amostras que encontravam-se com apenas um OSR; no terceiro portas-amostras que encontravam-se duas lamínulas juntas apenas foi instalado o terceiro termopar. No término da instrumentação das lamínulas, três delas (duas com o sistema de aquecimento acoplado e a terceira sem aquecimento) foram contaminadas com uma fina camada de tetrametiltetrafeniltrisiloxane (DC-704), como apresentado na figura 2. O componente encontrado na contaminação das superfícies do satélite é compatível ao óleo DC-704. (Stewart et al. 1990)(HELTZEL, et al. 2003)

A fina camada de óleo depositada sobre as amostras foi feita utilizando-se um lenço especial para limpeza de instrumentos para vácuo, que não deixa fiapos ou vestígios, embebido com o óleo DC-704,

o contaminante, e aplicado diretamente sobre a superfície dos OSR' s, respeitando a direção da aplicação, a fim de buscar uniformidade na película.

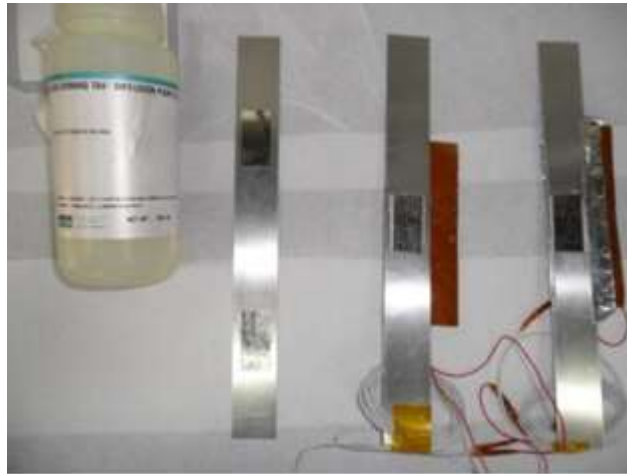


Figura 3: Amostras fixadas e contaminadas com o DC-704.

Os *skin heaters* e os termopares das amostras foram acoplados no porta-amostras e os conjuntos posicionados dentro da câmara de vácuo. As conexões elétricas com o meio externo foram feitas por conectores herméticos de tensão para interface de vácuo-ambiente externo, conhecidos como *feedthroughs*.

A fonte de radiação ultravioleta, composta por seis lâmpadas de vapor de mercúrio, foi instalada sobre as amostras em uma janela no topo da câmara. Essa janela, fabricada em sílica fundida, permite a passagem de 98% de toda radiação ultravioleta emitida pelo conjunto de lâmpadas e incidida sobre as amostras.

Cada aquecedor foi alimentado por uma fonte de tensão LAMBDA controlada manualmente de acordo com a leitura da temperatura. A figura 3 mostra o esquema do arranjo experimental composto por lâmpadas, amostras, as ligações dos instrumentos de medida e alimentação.

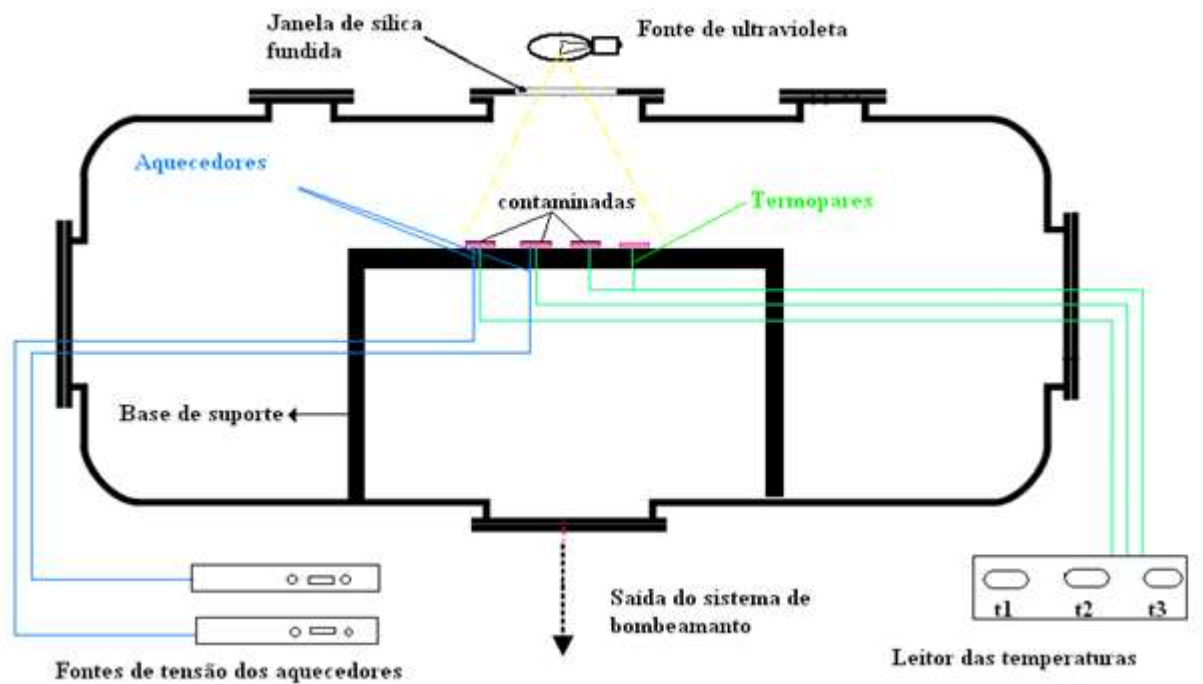


Figura 4: Esquema do aparato experimental realizado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Antes de ser iniciado o teste de degradação, foi medida a absorvidade térmica na banda solar (α_s) daquelas lamínulas com a contaminação e sem a contaminação (grupo controle). Para o experimento de degradação, foi seguida uma sequência de passos para simular o que ocorreria no ambiente espacial:

- 1°. Ligar o sistema de bombeamento primário e secundário de vácuo: pressão final de $1,16 \times 10^{-5}$ mbar;
- 2°. Ligar as fontes de tensão de alimentação dos *skin heaters* e reguladas potências para que as temperaturas das amostras chegassem próximo ao determinado;
- 3°. Ligar a fonte de radiação ultravioleta e mantida a temperatura dos espécimes estabilizada até o final do teste.

O teste de degradação teve a duração total de 11 horas de exposição a radiação ultravioleta, em alto vácuo e aquecimento constante e estável das amostras. A lâmpada ultravioleta, na faixa de 200 a 280nm, teve sua potência luminosa total de 16,8 Watts, o que forneceu radiação equivalente à aproximadamente 38 horas de radiação solar ininterruptas, na mesma faixa de comprimentos de

onda. A figura 4 apresenta o porta-amostra recebendo a radiação ultravioleta pela janela superior da câmara de vácuo.

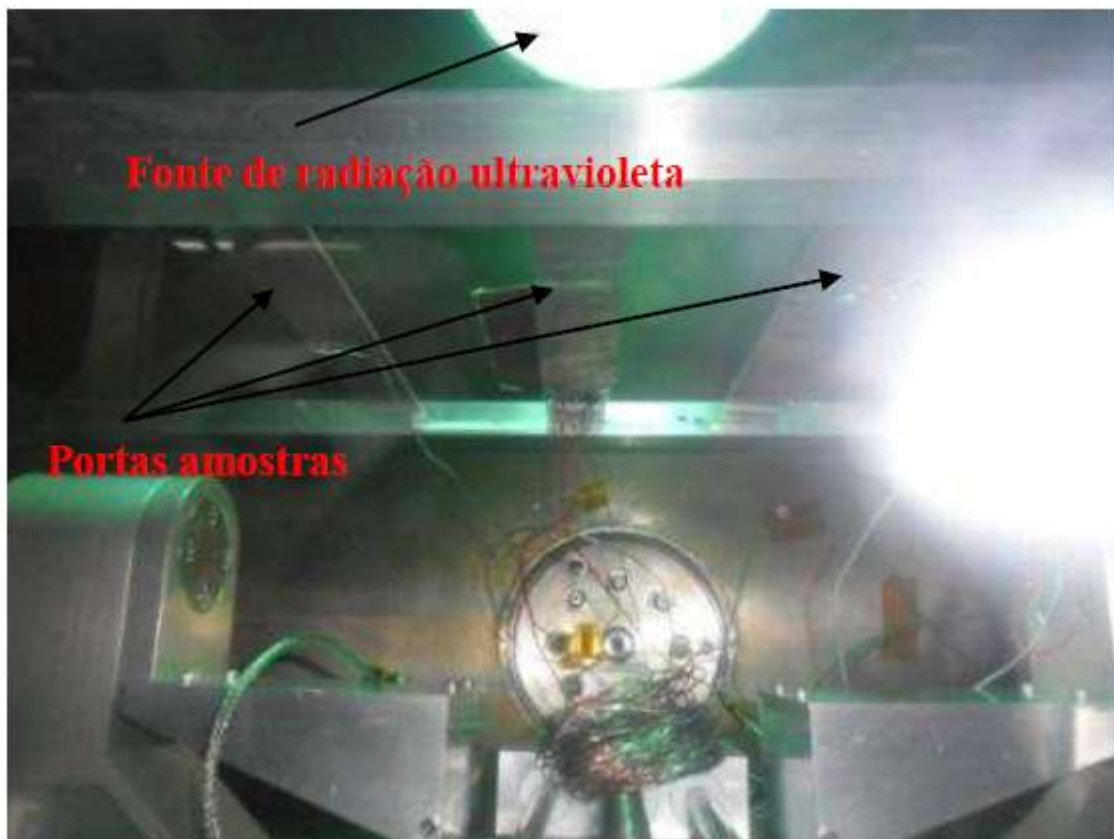


Figura 5: Lamínulas recebendo a radiação emitida pelo conjunto de lâmpadas ultravioleta.

Ao final do teste, os OSR foram retirados dos de dentro da câmara para ser realizado um exame visual. O que pôde ser observado foi que a lamínula que ficou com a temperatura de aproximadamente 80°C encontrava-se, aparentemente, com quantidade menor de contaminante que a exposta a aproximadamente a 25°C. Isso sugere que as superfícies com temperaturas mais elevadas têm menores taxas de deposição porque, ao se depositarem elas rapidamente evaporam.

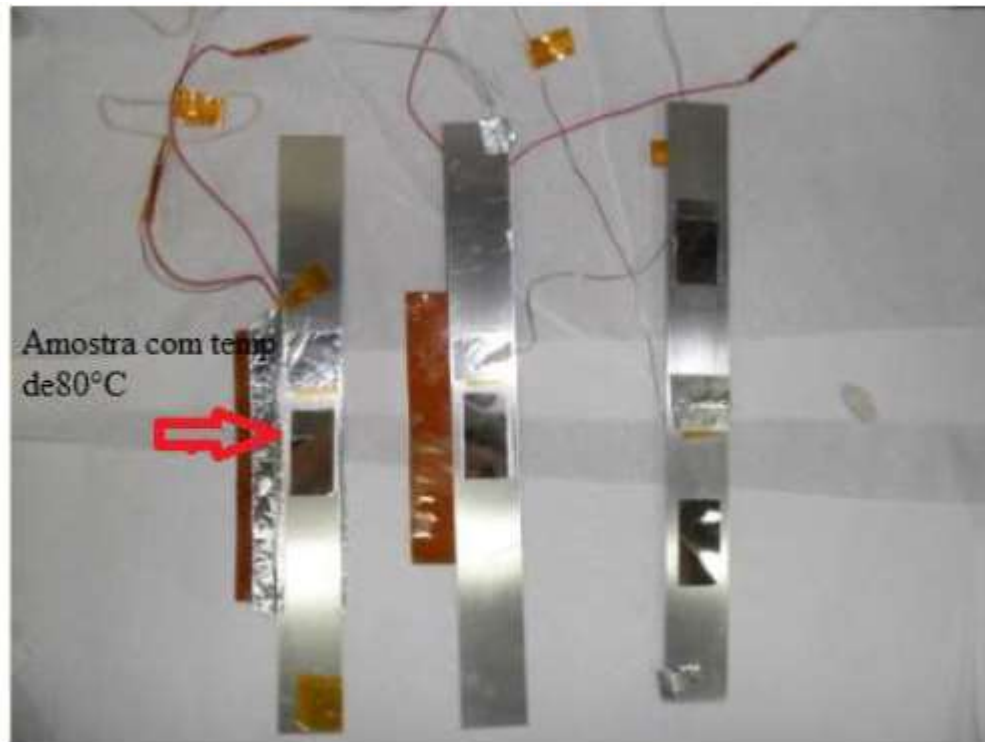


Figura 6: Amostras ao final do experimento.

Além disso, os α_s das amostras foram novamente medidos. Os resultados mostraram uma leve mudança em comparação as medidas feitas antes do experimento de degradação. A tabela 2 mostra os dados no início e no final do teste.

Tabela 2: Dados do teste de degradação com relação à absorvidade térmica solar (α_s).

<i>Dados retirados do teste</i>	<i>Medidas iniciais de α_s</i>	<i>Início dos testes</i>	<i>Final dos testes</i>	<i>Medidas finais de α_s</i>
<i>1° OSR contaminada</i>	<i>0,020±0,004</i>	-	-	<i>0,022±0,004</i>
<i>2° OSR contaminada</i>	<i>0,018±0,002</i>	-	-	<i>0,020±0,002</i>
<i>3° OSR contaminada</i>	<i>0,020±0,001</i>	-	-	<i>0,022±0,001</i>
<i>4° OSR não contaminada</i>	<i>0,020±0,003</i>	-	-	<i>0,020±0,003</i>
<i>Pressão da câmara</i>	-	<i>1.16x10⁻⁵mbar</i>	<i>1.15x10⁻⁷mbar</i>	-
<i>Temperatura 1° OSR</i>	-	<i>80,9°C</i>	<i>78,6°C</i>	-
<i>Temperatura 2° OSR</i>	-	<i>46,4°C</i>	<i>47,8°C</i>	-
<i>Temperatura 3° OSR</i>	-	<i>24,1°C</i>	<i>32,3°C</i>	-
<i>Temperatura 4° OSR</i>	-	<i>24,1°C</i>	<i>32,3°C</i>	-

As medidas de α_s no início e no final do teste de degradação não mostraram variações expressivas como esperado, provavelmente porque o tempo de exposição a radiação ultravioleta, em vácuo, foi inferior se comparado com a exposição prevista para voo de um satélite exposto em ambiente espacial.

UMA ANALISE SOBRE O EXPERIMENTO PRÁTICO

O depósito de contaminante no experimento sobre o OSR foi maior se comparado com a literatura para situações reais em ambiente espacial. O tempo de exposição foi insuficiente para ocorrer um enegrecimento que pudesse ser mais significativo, alterando claramente as medidas de α_s .

O que pode ser observado neste experimento é:

- O teste valida a relação hipotética entre temperatura de superfície do OSR e taxa de contaminantes depositados sobre ele;
- A ocorrência da degradação fotoquímica do orgânico volátil, oriundo do satélite, na presença da radiação ultravioleta em vácuo, é um processo lento e necessita de um período significativamente maior de exposição a essa radiação.

EFEITO DA DEGRADAÇÃO UTILIZANDO UM SIMULADOR (*SIND/FLUIT*[®])

Resumo: O experimento deve ser exposto à radiação solar e ter sua temperatura monitorada e, com base nisso, determinar a variação dos α s conforme o aumento da degradação do OSR' ao longo do tempo. Foi feita uma análise utilizando o programa matemático SINDA/FLUINT para determinar a relação do aumento da temperatura do radiador com o aumento dos α s.

A degradação apresentada neste experimento será estudada em um ambiente espacial e os dados deste experimento serão extraídos indiretamente, pois o único dado que será coletado serão as temperaturas da amostra.

Com as medidas de temperaturas podemos correlacionar com degradação do OSR, pois a medida que o material sofre degradação de suas propriedades termo ópticas ocorrerá o aumento da temperatura.

REQUISITOS E CARACTERÍSTICAS DO EXPERIMENTO

A correlação da degradação com o aumento da temperatura implica na necessidade de isolar, o quanto possível, a amostra do satélite. Assim faz-se necessário os requisitos abaixo:

- Plataforma isolante para fixar a amostra e que deve ser parafusada na parte externa da parede do satélite;
- A plataforma deve estar isolada do meio externo para que não sofra a influência das temperaturas externas;
- A amostra deve estar fixada na plataforma e isolada do satélite;
- A amostra deve estar exposta ao ambiente externo.

As principais características do experimento são:

- O OSR é fixado em uma plataforma feita de PTFE ou FR4;
- A plataforma é totalmente coberta com Multilayer Insulation (MLI), exceto os OSR, para isolar, tanto quanto possível, do meio externo e do próprio satélite;
- Os OSR são colados sobre uma placa de alumínio o qual é fixada na plataforma;
- Na outra face do alumínio é fixado um thermistor e um skin heater. O thermistor para a leitura da temperatura e o skin heater para manter a temperatura da amostra mais estável;
- Um conector para ligar o skin heater e o thermistor na cablagem do satélite.
- A potência do heater é fixada em 0.7W
- A massa total do experimento é de 204 gramas.
- O valor de absorvidade do OSR é de 0.03 e o valor de emissividade é de 0.8 [7].

Na Fig. 7 podemos visualizar um desenho esquemático do experimento.

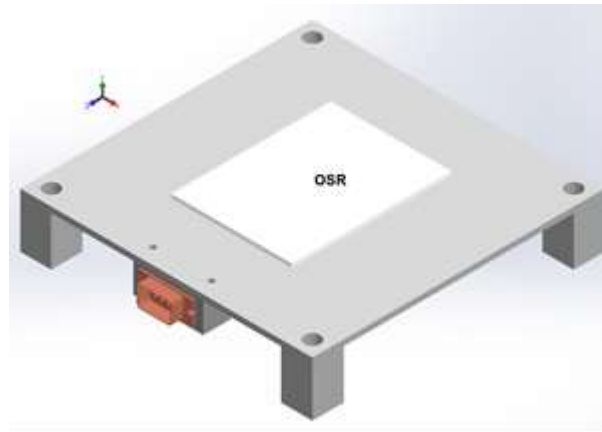


Fig. 7. Desenho do experimento que será instalado no lado externo do satélite.

Para a análise do modelo térmico matemático foi utilizado o programa *SIND/FLUIT*[®]. Este projeto térmico foi fundamentado em um método nodal de cálculo no qual cada nó assume-se que é isométrico.

Cada nó interage com os outros a seu redor via condução e radiação como também interagem via radiação com o espaço. Portanto a temperatura de cada nó e o resultado da interação entre eles e o espaço. (Marshall, e BREUCH, 1968)

A equação do balanço de Energia é a base dos cálculos que regem este sistema. A Eq. 1 está explicitada todas as energias trocadas por cada nó.

$$m_i C p_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n+1} R_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4) + \sum_{j=1}^n B_{ji} (T_j - T_i) + Q_i \quad (1)$$

$$i = n + 1$$

Quando a massa térmica é o mcp [J/K]. As cargas térmicas são o Q_i [W], e o calor interno dissipado é QD [W].

Os fatores de troca de condução e radiação são representados por B_{ij} [W/K] e R_{ij} [m^{-2}], respectivamente. A constante de Stefan-Boltzmann é σ [$W/m^2/K^4$], e o T_i , e T_j [K] são respectivamente as temperaturas nos nós i e j .

O primeiro termo da equação é a variação da energia interna do nó. O segundo termo é a soma do calor trocado por radiação com os demais nós.

O terceiro termo é a soma do calor trocado por condução. O Q_i é o calor vindo da radiação externa ou de uma fonte interna. Ou seja, a equação representa que a taxa variação da energia interna (termo da direita) é igual ao calor recebido de outros por radiação e condução mais o calor de fonte externa ou interna (termo da esquerda).

Fazendo-se este balanço em cada nó do modelo tem-se então n equação deste tipo e as incógnitas são as n temperaturas. Obtêm-se as temperaturas resolvendo este sistema de equações.

OS PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO TÉRMICO MATEMÁTICO.

Para este experimento foi utilizado os parâmetros do satélite Amazonia1 desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Esses parâmetros são utilizados apenas para simular o experimento em vôo, ou seja, se mudar os parâmetros de órbita, mudará as temperaturas obtidas no programa. (SILVA, et. all, 2014)

Para este satélite estudamos dois casos. O caso frio é quando o planeta está no afélio de sua órbita e o caso quente quando o planeta está no periélio de sua órbita. Assim na tabela 1 temos os dados dos dois casos que foram utilizados no programa.

Tabela 3: Dados dos parâmetros de energia recebida pelo satélite

Parameter	Hot Case	Coud Case
Albedo Earth	0.42	0.34
radiation(W/m ²) Solar	233	208
radiation(W/m ²)	1418	1326

Para o MLI utilizado no experimento foi utilizado como nó aritmético com sua emissividade 0.8, sua absortividade 0.45 e sua emissividade efetiva 0,02. (Silva, et AL. 2014)

As temperaturas calculadas foram geradas com a mudança na absortividade do OSR. A medida que foi imposto um acréscimo no valor de α o programa gerava uma nova temperatura. Na tabela 2 estão os valores das temperaturas com os seus respectivos valores de α .

Tabela 4: Absortividade(α_s) versus Temperatura(T)

α	Hot Case T(°C)	Coud Case T(°C)
0.03	26.32	20,32
0.04	28.74	22,4
0.05	30.3	23,42
0.06	32.01	25,45
0.07	32.89	27,06
0.08	34.45	28,65
0.09	36.1	29,99
0.10	37.38	31,66

Com estas temperaturas podemos quantificar o valor da degradação do OSR, em um ambiente espacial.

Se ocorrer uma degradação ela poderá estar em valores intermediários aos quais estão apresentados nesta tabela, assim podendo ser que o planeta esteja na posição intermediária aos casos quente e frio ou a degradação esteja em valores intermediários aos da tabela.

UMA ANALISE SOBRE A SIMULAÇÃO

O OSR é um revestimento de controle térmico fácil de manusear e instalar no satélite. E um material de alta qualidade e utilizado em muitos satélites do mundo. Este experimento mostrará se o OSR brasileiro possui resistência na vida útil do satélite.

Este estudo mostra a viabilidade deste experimento e a possibilidade de quantificar o valor de uma degradação possível como também, e caso haja, um estudo possível da degradação com relação ao tempo de vida no espaço.

Um estudo com um modelo térmico, o qual demonstra uma praticidade na visualização do caso de uma possível redução de um experimento em um ambiente espacial, possibilidades para o estudo vislumbrar com outros materiais de controle térmico em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- BOATO, M. G., Desenvolvimento e Fabricação de Uma Superfície Óptica Refletores Para Radiadores Térmicos de Satélite. 2014. 148f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- BOATO, M. G.; GARCIA, E. C.; SANTOS, M. B.; FERNANDES, G. F., Testes de degradação por foto deposição de um refletor solar óptico para controle térmico de satélites. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo (Impresso). , v.34, p.39, 2015.
- BOATO, M. G.; GARCIA, E. C.; OLIVEIRA, M. M., Optical Solar Reflector Degradation Analyses Defining Test Parameters for In Orbit Space Use. Revista para Graduandos- Interdisciplinar, , v.7, n1, 2022.
- DEVER, J.A., BRUCKNER, E.J., SCHEIMAN, D.A., STIDHAM, C.R., Contamination and Space Environmental Effects on Solar Cells and Thermal Control Surfaces. Journal of Spacecraft and Rocket. Vol. 32, n° 5, Set.-Out., 1995. Pag. 850.
- GILMORE, D. G., Satellite Thermal Control Handbook. Volume I: Fundamental Technologies, Second Edition, The Aerospace Corporation Press, El Segundo, California, 1994.
- HELTZEL, S., SEMPRIMOSCHNING, C.O.A., VAN EESBEEK, M.R.J., Environmental Testing of Thermal Control Materials at Elevated Temperature and Intense Ultraviolet Radiation. Journal of Spacecraft and Rocket. Vol. 46, n° 2, Mar.-Abr., 2009. 248 p.
- MARSHALL, K. N. S.; BREUCH, R. A., Optical Solar Reflector: A highly stable, low α/ϵ Spacecraft Thermal Control Surface. Journal of Spacecraft and Rocket. Vol. 5, no 9, September, 1968. Pg.1051-1056.
- SILVA, D. F.; MURAOKA, I.; GARCIA, E. C.; Thermal Control Design Conception of the Amazonia 1. Journal. Aerospace Technology. Management., São José dos Campos, Vol.6, No 2, pp.169 -176, Apr.-Jun., 2014.
- VILELA, R. D.; GARCIA E. C., Numerical Model for Analysis in Space Radiators for Critical Conditions Operating, (2014) International Review of Mechanical Engineering (IREME), 8 (5), pp. 845 - 850.

Capítulo 8



10.37423/220706332

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO TEMPERADO EM ÁGUA POR MEIO DA METALOGRAFIA QUANTITATIVA

Lucas dos Santos Souza

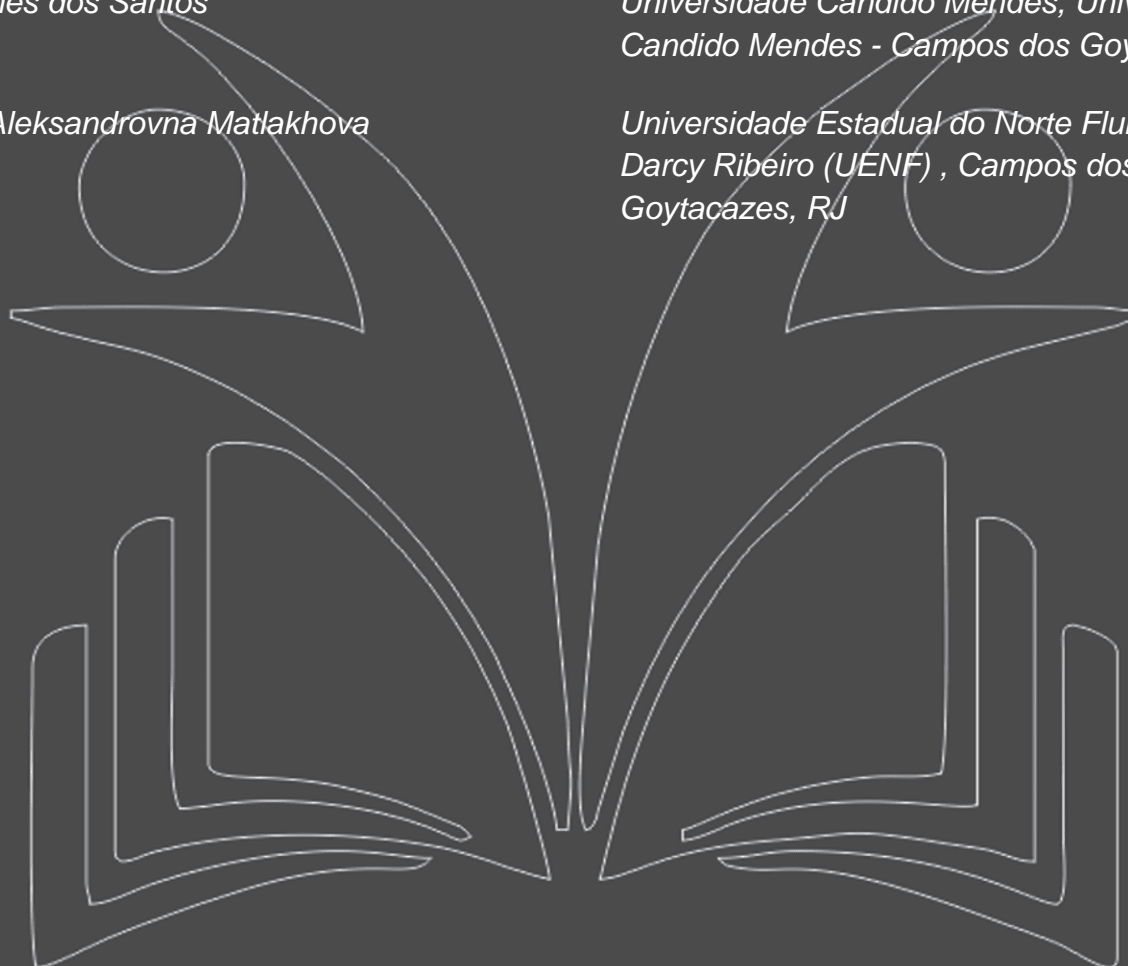
*Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro (UENF), dos Goytacazes, RJ*

Felipe Gomes dos Santos

*Universidade Candido Mendes, Universidade
Candido Mendes - Campos dos Goytacazes*

Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova

*Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos
Goytacazes, RJ*



Resumo: O presente trabalho teve como objetivo caracterizar qualitativa e quantitativamente a microestrutura de uma amostra de aço austenizado a 930°C e temperado em água. A caracterização determinou os constituintes presentes, e suas frações volumétricas, verificou a existência de anisotropia e determinou os valores de microdureza das fases presentes na microestrutura. Para tal, uma amostra foi preparada metalograficamente através de lixamento e polimento, fez-se o uso de microscópio ótico e microdurômetro para avaliação qualitativa e quantitativa da amostra, com uso dos padrões linear, reticulado e pontual, assim como gráfico polar sob as imagens obtidas. Como resultado da análise qualitativa, foi identificada a presença de duas fases distintas, uma de grãos claros e outra de grãos escuros, que através de comparação com imagens presentes na literatura, assume-se que sejam de ferrita e martensita, respectivamente. A análise quantitativa da amostra permitiu evidenciar que a fração volumétrica média de ferrita foi de 24,6%, com dureza de $210,8 \pm 30,8\text{HV}$, e a martensita obteve 75,2% de fração volumétrica e dureza de $331,8 \pm 32,8\text{HV}$. Por fim, evidenciou-se que o material não possui uma direção preferencial para orientação dos grãos.

INTRODUÇÃO

Ligas a base de ferro ocupam lugar de destaque entre os materiais industriais há, pelo menos, dois séculos, sendo que o aço, é liga a base de ferro mais aplicada. As propriedades mecânicas dos aços são sensíveis ao teor de carbono, que normalmente é inferior a 1,0%p. Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a sua concentração de carbono, sendo classificados em: hipoeutetóides aqueles com concentração de carbono inferiores a 0,77%; hipereutetóides aqueles que possuem concentração superior a 0,77% (acima de 2,11% chama-se ferro fundido); e quando a concentração de carbono é igual a 0,77% são nomeados, aços eutetóides (Colpartert e Costa, 2008; Callister e Rethwisch, 2012).

O ferro é um metal de transição que se caracteriza por apresentar três fases alotrópicas (α , γ , δ), podendo ser cúbico de corpo centrado (CCC – Ferro α , ferrita) abaixo de 912°C, cúbico de face centrada (CFC – Ferro γ , austenita) a temperaturas entre 912°C e 1400°C, e novamente, cúbico de corpo centrado (CCC – Ferro δ , ferrita) acima de 1400°C até sua temperatura de fusão (1538°C). Para um aço de baixo teor de carbono, espera-se uma microestrutura formada pela fase ferrita (Ferro α) e pelo constituinte perlita, que é formada por lamelas alternadas das fases ferrita e cementita (Fe_3C), esta última sendo um composto intermetálico de 6,67%p de C (Chiaverini, 2012; Callister e Rethwisch, 2012).

A formação da ferrita e da cementita, conseqüentemente da perlita, exige a mudança do reticulado cristalino do ferro, assim como o movimento de átomos por difusão através da austenita sólida durante o resfriamento; tais modificações levam tempo. Em conseqüência, se for aumentada a velocidade de resfriamento da austenita, poderá não haver tempo suficiente para uma completa movimentação atômica e novos constituintes podem se formar, como a martensita. A martensita é uma fase metaestável, composta por ferro saturado de carbono com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), sendo caracterizada por apresentar elevada dureza (Chiaverini, 2012).

Uma das técnicas que pode ser utilizada para se observar e caracterizar microestruturas de materiais metálicos é a microscopia ótica, que produz imagens ampliadas de um objeto. A imagem dos microscópios óticos é gerada através de processos físicos, resultantes da interação da luz branca visível com o material examinado, onde um feixe de luz incide sobre um objeto não transparente é refletido de modo não homogêneo aos olhos do observador, gerando um contraste estrutural, ou seja, uma imagem da estrutura (Santos e Matlakhova, 2018; Matlakhov, 2010).

Para a caracterização de um material, é necessário retirar uma amostra do material a ser estudado, passando pelo processo de preparação metalográfica, que consiste em remover a camada estruturalmente danificada da superfície, de modo estar plana e limpa, expondo a estrutura original do material a ser examinado. A preparação metalográfica pode ser dividida nas seguintes etapas: corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Na caracterização de um material, utiliza-se a metalografia qualitativa e quantitativa, de modo que o objetivo da metalografia qualitativa é avaliar e interpretar os aspectos estruturais gerais visíveis através da microscopia ótica, são eles: morfologia dos cristalitos, orientação microestrutural, fases presentes, heterogeneidade química, inclusões não metálicas e descontinuidades. Já a metalografia quantitativa tem como objetivo determinar características numéricas das estruturas dos materiais através dos padrões metalográficos, tais como: número de grãos por unidade de área, tamanho médio de grão, área média de grão e fração volumétrica dos constituintes (Santos e Matlakhova, 2018; Colpaert, 2008; Matlakhov, 2010).

MEDOTOLOGIA

PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

O material utilizado nesse estudo foi uma amostra de aço austenizado a 930 °C e temperado em água. Tendo em vista que a amostra já possuía dimensões apropriadas para análise metalográfica, não foi realizado o procedimento de corte, mas, para facilitar o manuseio, realizou-se a montagem através do embutimento a quente, utilizando-se a prensa de embutimento Arotec Pre-30 automática juntamente com o desmoldante Arotec D-30 e resina de baquelite também da Arotec.

Para minimizar a espessura da amostra danificada estruturalmente por histórico anterior (corte, tratamento térmico e/ou ataque químico) foi realizado o lixamento úmido na lixadeira manual, utilizando as lixas com as seguintes granulometrias: 100, 200, 320, 400, 600 e 1200 mesh, alternando sempre a direção de lixamento, de modo perpendicular, aos riscos deixados pela lixa anterior. Os riscos foram controlados por observações em microscópio ótico Olympus. Em seguida, realizou-se o polimento manual utilizando pasta abrasiva de alumina (Al_2O_3) da Arotec, sequencialmente, de granulometria igual a 1 μm , 0,3 μm e 0,05 μm respectivamente, sobre um pano adequado à pasta utilizada.

Para revelar a microestrutura, utilizou-se o ataque químico, que se baseia na dissolução seletiva da amostra pelo reagente químico, ou seja, alguns grãos e fases são mais atacados que os demais. Dessa forma, quando observado pelo microscópio ótico, cada grão irá refletir a luz de uma forma distinta de

seus vizinhos, produzindo assim um realce nos contornos de grãos e contraste das diferentes fases presentes na amostra (Rohde, 2010). O ataque químico foi realizado com uma solução de Nital 2% (98 ml de álcool etílico + 2 ml de ácido nítrico), este reagente é o mais efetivo para aços, pois ataca a ferrita, perlita, martensita e os contornos de grão. Realizou-se o ataque através da técnica conhecida como pincelamento, que consiste em molhar um pedaço de algodão no reagente (Nital 2%) e através de movimentos de pinceladas passá-lo na amostra a ser atacada, com duração de aproximadamente 30 segundos. Deste modo, obteve-se micrografias da amostra em diferentes aumentos e campos de observação. As imagens foram transferidas para o computador através da vídeo-câmera acoplada ao microscópio Neophot-32 e um software para captura de imagens.

METALOGRAFIA QUANTITATIVA

O objetivo da metalografia quantitativa é determinar características numéricas em relação a estrutura analisada, tais como: número de grãos por unidade de área (n), tamanho médio do grão (d), área média do grão (A) e fração volumétrica dos constituintes (C_v). No presente trabalho a quantificação foi realizada por três tipos de padrões (linear, reticulado, pontual) e pelo método do gráfico polar.

O método do padrão linear consistiu na aplicação de cinco linhas de teste horizontais, calibradas com o auxílio do micrômetro objeto, em duas regiões distintas e aleatoriamente escolhidas da amostra. Para uma estrutura bifásica não uniforme (constituída de α e β), pode-se determinar algumas características da fase α de acordo com as equações abaixo:

$$d_{(\alpha)} = \frac{L_{t(\alpha)}}{n_{t(\alpha)}} \quad (1)$$

$$A_{(\alpha)} = d_{(\alpha)}^2 \quad (2)$$

$$C_{V(\alpha)} = \frac{L_{t(\alpha)}}{L} \quad (3)$$

Sendo:

– $L = kl$: comprimento total das linhas de teste; k : número das linhas de teste; l : comprimento de uma linha de teste; sendo que k linhas são equidistantes e não cessam os mesmos grãos.

– $L_{t(\alpha)}$: comprimento de todos os grãos- α inteiramente e parcialmente interceptados pelo padrão. Para os grãos de outra fase (β) ou constituinte (por exemplo, perlita, nos aços a carbono), o método é análogo;

– $nt(\alpha) = n_i + 0,5 n_p$: representa o número de todos os grãos- α interceptados pelo padrão linear constituído de k linhas, aplicado à estrutura; n_i e n_p - número de grãos- α inteiramente e parcialmente interceptados pelo padrão. Para os grãos de outra fase (β) ou constituinte (perlita, nos aços a carbono), o método é análogo;

– $d(\alpha)$: tamanho médio dos grãos da fase α ;

– $A(\alpha)$: área média dos grãos da fase α ;

– $C_v(\alpha)$: fração volumétrica dos grãos da fase α ;

Para realizar o método do padrão reticulado, aplicou-se uma malha quadrática, previamente calibrada com o auxílio do micrômetro objeto, sobre uma região aleatória da amostra para medir a área de todos os grãos de uma fase de interesse contidos no interior do padrão. As características da fase α em uma estrutura bifásica não uniforme são obtidas pelas equações:

$$A_{(\alpha)} = \frac{A_t}{n_t} \quad (4)$$

$$n_{(\alpha)} = \frac{n_t}{A_t} \quad (5)$$

$$d_{(\alpha)} = \sqrt{A_{(\alpha)}} = \frac{1}{\sqrt{n_{(\alpha)}}} \quad (6)$$

$$C_{V(\alpha)} = \frac{A_t}{A_p} \quad (7)$$

Sendo:

– $A_p = b \times h$: área do padrão previamente calibrado; onde b é o comprimento do lado do padrão e h a altura do padrão; m^2 e m : menor área e menor divisão do padrão;

– $A_t = \sum A_{\alpha i}$: área de todos os grãos- α contidos no interior de padrão; $A_t = (S_{(\alpha)} + 0,5 S_{(\alpha/\beta)}) \times m^2$, onde $(S_{(\alpha)} + 0,5 S_{(\alpha/\beta)})$ é o número dos quadrados do padrão inteiramente e parcialmente posicionados sobre os grãos da fase α . Para os grãos- β o método é análogo;

– $n_t = n_{ni} + 0,5 n_i + 0,25 n_a$: número de todos os grãos- α contidos no interior do padrão; n_{ni} e n_i : número dos grãos- α não interceptados e interceptados pelos lados do padrão; n_a : número dos grãos- α que permanecem nos ângulos do padrão. Para os grãos- β o método é análogo;

– $n_{(\alpha)}$: número de grãos por unidade de área referente à fase α ;

– $A_{(\alpha)}$: área média dos grãos da fase α .

No método do padrão pontual, aplicou-se uma malha contendo 121 pontos sobre duas regiões distintas e aleatoriamente determinadas da amostra e contou-se a quantidade de pontos de teste localizados sobre as fases. Para determinar a fração volumétrica utilizou-se a seguinte equação:

$$C_{V(\alpha)} = \frac{V_{(\alpha)}}{V_a} = \frac{N_{(\alpha)}}{N_p} \quad (8)$$

Sendo:

– $V_{(\alpha)}$ e V_a : volume da fase α e da amostra;

– $N_{(\alpha)}$ e N_p : número dos pontos de teste localizados nos grãos- α e número total de pontos de teste. Para os grãos- β o método é análogo.

Para realizar o método do gráfico polar, contou-se o número de contornos de grãos interceptados em cada linha, de mesmo comprimento, traçadas com espaçamento de $\Delta\theta = 10^\circ$ até completar um quarto de círculo que foram aplicadas sobre a microestrutura do material. A partir destes valores, construiu-se um gráfico tendo como coordenadas o número dos contornos de grãos interceptados e o ângulo de inclinação das linhas de teste (θ). Quando a estrutura é isotrópica a curva polar é circular, mas se a estrutura for anisotrópica a curva fica deformada em direção à orientação preferencial dos grãos.

MICRODUREZA

Realizou-se o ensaio de microdureza da amostra através do microdurômetro Shimadzu HVM-2T na escala Vickers (HV) com uma carga de 50 gramas durante 10 segundos. Um penetrador de diamante com formato de pirâmide de base quadrada realizou a carga sobre a microrregião desejada, marcando-a com uma impressão quadrada, e a medida dessa impressão é utilizada juntamente com a carga para o cálculo da microdureza Vickers através da Eq. (9).

$$HV \left(\frac{kgf}{mm^2} \right) = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (9)$$

Sendo:

- F: carga aplicada, em gramas;

- d: diagonal da impressão regular quadrática, em μm ;

TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A análise quantitativa da microestrutura da amostra gerou uma grande quantidade de dados, portanto, para conseguir valores representativos, os resultados foram tratados estatisticamente através das seguintes fórmulas:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} - (x_m)^2} \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{x_m} 100 \quad (12)$$

$$\varepsilon = t\sigma \quad (13)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{x_m} 100 \quad (14)$$

$$x = x_m \pm \varepsilon \quad (15)$$

Sendo:

- x_m : média aritmética;
- σ : desvio-padrão;
- δ : coeficiente de variação;
- ε : erro absoluto;
- t : coeficiente de Student, que está relacionado com a probabilidade P na Tab. (1);
- ε_r : erro relativo;
- x : nível de confiança;

Tabela 1 – Probabilidade (P) em função do coeficiente de Student (t) (Matlakhov, 2010).

P	t	P	t	P	t	P	T	P	t
0,0796	0,1000	0,5160	0,7000	0,7698	1,2000	0,9108	1,7000	0,9836	2,4000
0,1586	0,2000	0,5762	0,8000	0,8000	1,2816	0,9282	1,8000	0,9900	2,5758
0,2358	0,3000	0,6000	0,8416	0,8064	1,3000	0,9426	1,9000	0,9906	2,6000
0,3108	0,4000	0,6318	0,9000	0,8384	1,4000	0,9500	1,9600	0,9948	2,8000
0,3830	0,5000	0,6826	1,0000	0,8664	1,5000	0,9544	2,0000	0,9973	3,0000
0,4514	0,6000	0,7000	1,0364	0,8904	1,6000	0,9722	2,2000	0,9980	3,0902
0,5000	0,6745	0,7286	1,1000	0,9000	1,6449	0,9800	2,3263	0,9999	4,0000

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da caracterização qualitativa, identificou-se que a amostra é constituída uma estrutura bifásica, com grãos claros (fase α) e escuros (fase β ou de um constituinte) não uniformes e sem uma direção preferencial. Comparando-se com micrografias disponíveis na literatura (Colpaert, 1974; Callister e Rethwisch, 2012), presumiu-se que os grãos claros sejam a fase ferrita e os grãos escuros representem a fase martensita. A Figura 1, apresenta algumas das micrografias obtidas em diversos aumentos.

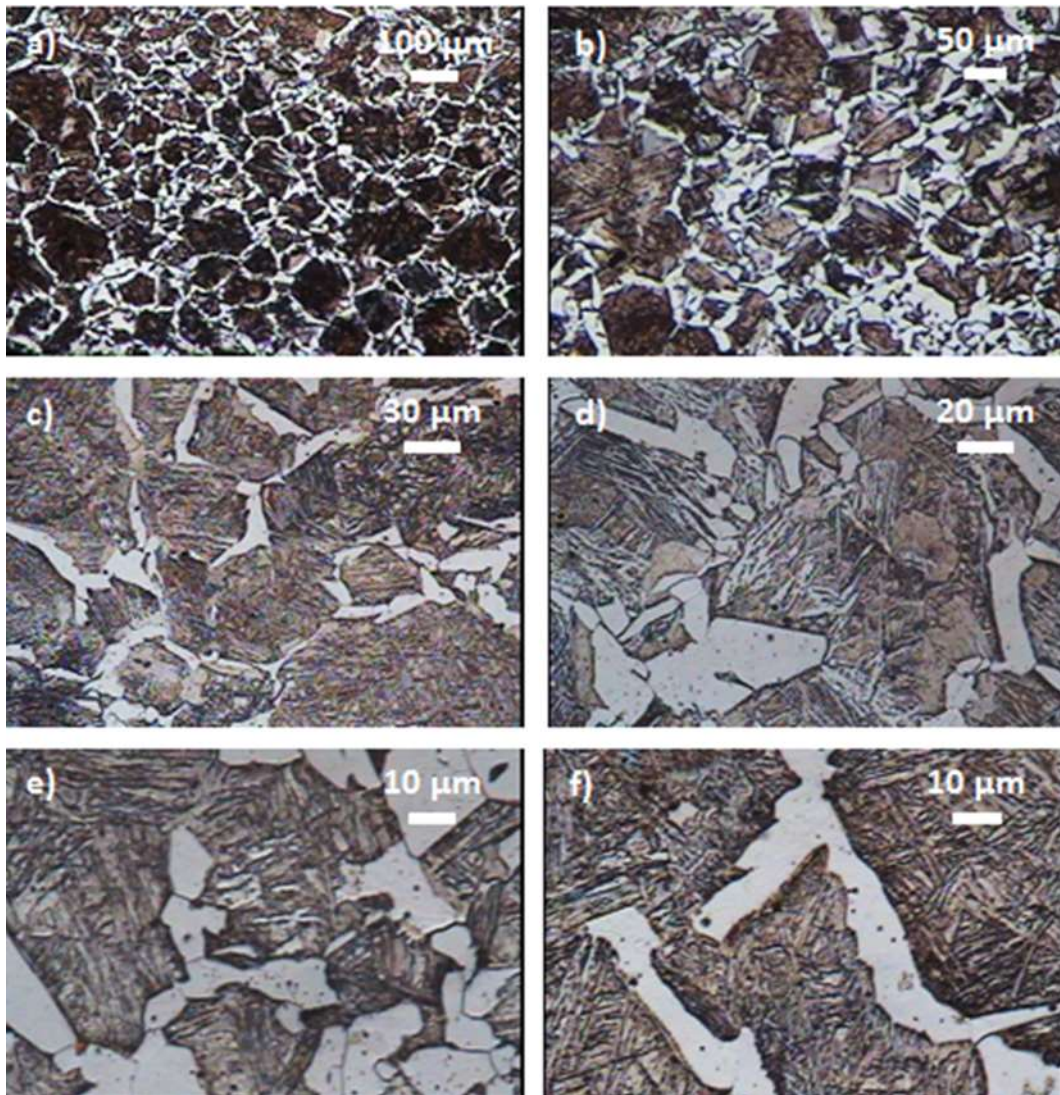


Figura 1 - Micrografia de um aço SAE 1020 temperado em água. Aumentos de (a) 50x, (b) 100x, (c) 200x, (d) 320x, (e) 500x e (f) 500x. Campo Claro. Ataque Nital 2%.

Empregando-se a caracterização quantitativa pelo método do padrão linear, após a calibração, obteve-se a menor divisão da escala (m) igual a $10 \mu\text{m}$, sendo o comprimento de cada uma das cinco linhas de $280 \mu\text{m}$, o que resultou em um comprimento total (L) de $1400 \mu\text{m}$. A quantificação se baseou em duas regiões diferentes da amostra, a Figura 2 apresenta a imagem obtida nas regiões A) e B) com as linhas do padrão linear de teste. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com este método, sendo α a ferrita e β a martensita.

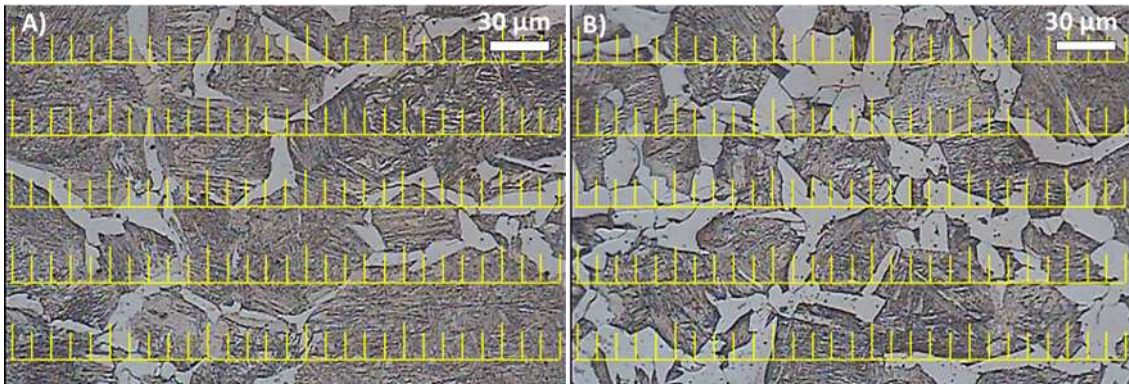


Figura 2 – Método do padrão linear aplicado as regiões A) e B). Campo claro. Aumento 200x.

Tabela 2 – Resultados obtidos pelo método do padrão linear

Região A	Região B
$L = 1,4 \text{ mm}$	$L = 1,4 \text{ mm}$
$n_{t\alpha} = 20$	$n_{t\alpha} = 37,5$
$L_{t\alpha} = 0,247 \text{ mm}$	$L_{t\alpha} = 0,548 \text{ mm}$
$d\alpha = 0,0124 \text{ mm}$	$d\alpha = 0,0146 \text{ mm}$
$A\alpha = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$	$A\alpha = 2,1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$
$Cv\alpha = 17,64\%$	$Cv\alpha = 39,1\%$
$n_{t\beta} = 16$	$n_{t\beta} = 26,5$
$L_{t\beta} = 1,153 \text{ mm}$	$L_{t\beta} = 0,852 \text{ mm}$
$d\beta = 0,0721 \text{ mm}$	$d\beta = 0,0322 \text{ mm}$
$A\beta = 5,2 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$	$A\beta = 1,03 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$
$Cv\beta = 82,36\%$	$Cv\beta = 60,1\%$

No método do padrão reticulado, conforme Figura 3, calibrou-se a malha quadricular sobre duas micrografias de 200x e 320x de aumento. Sendo assim, a menor distância entre dois traços adjacentes “m” foi igual a $4,833 \times 10^{-3} \text{ mm}$ e $3,226 \times 10^{-3} \text{ mm}$, e a área “a” ($a = m^2$) igual a $2,336 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ e $1,040 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ para as regiões A e B, respectivamente. Tendo na horizontal um total de 60 reticulados e na direção vertical 40, podemos definir o valor de A_p igual a, $(60 \times 4,833 \times 10^{-3}) \times (40 \times 4,833 \times 10^{-3}) = 5,61 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ para região A e $(60 \times 3,226 \times 10^{-3}) \times (40 \times 3,226 \times 10^{-3}) = 2,50 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ para região B. Após contabilizar o número dos quadrados do padrão inteiramente e parcialmente sobre os grãos de ferrita

($S_{(\alpha)+0,5S_{(\alpha/\beta)}}$), aplicou-se as fórmulas da Eq. (4) a (7) e obteve-se os resultados demonstrados na Tabela 3.

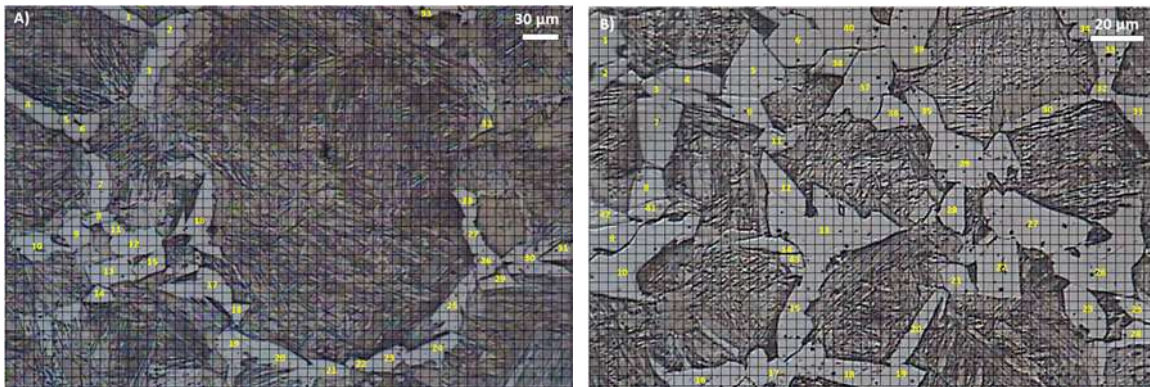


Figura 3 – Método do padrão reticulado aplicado as regiões A - aumento 200x e B - aumento 320x. Campo claro.

Tabela 3 – Resultados obtidos pelo método do padrão reticulado

	n_t	A_p (mm^2)	A_t (mm^2)	$n_{(\alpha)}$ (mm^{-2})	$d_{(\alpha)}$ (mm)	$CV_{(\alpha)}$ (%)	$CV_{(\beta)}$ (%)
Região A	31	$5,61 \times 10^{-2}$	$8,64 \times 10^{-3}$	$3,59 \times 10^3$	$1,67 \times 10^{-2}$	15,4	84,6
Região B	36	$2,50 \times 10^{-2}$	$9,11 \times 10^{-3}$	$3,95 \times 10^3$	$1,59 \times 10^{-2}$	36,4	63,6

O método do padrão pontual constituiu-se na contagem da quantidade de pontos de teste localizados nos grãos de ferrita e de martensita com o aumento de 200x e 320x, sendo utilizadas duas regiões distintas da amostra, regiões A e B. A Figura 4 apresenta a micrografia obtida com a aplicação da malha de pontos (total 121 pontos) para análise e os resultados de fração volumétrica de ferrita ($CV_{(\alpha)}$) e martensita ($CV_{(\beta)}$) na Tabela 4.

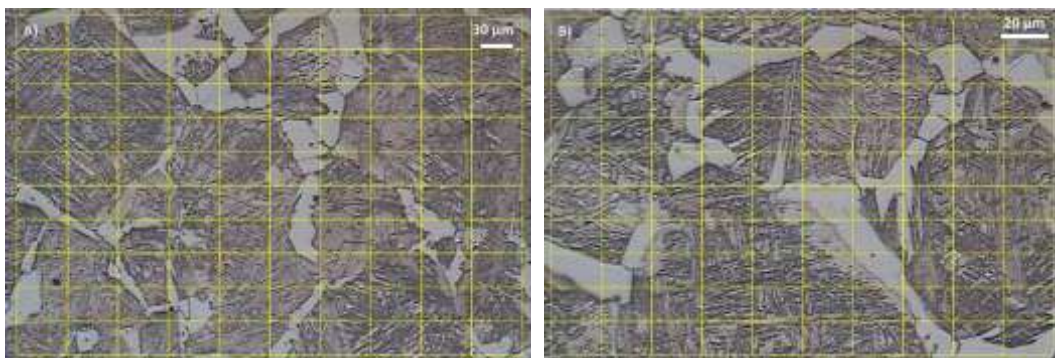


Figura 4 – Método do padrão pontual aplicado as regiões A - aumento 200x e B - aumento 320x. Campo claro.

Tabela 4 – Frações volumétricas de ferrita e martensita pelo método do padrão pontual

	$C_{V(\alpha)}$ (%)	$C_{V(\beta)}$ (%)
Região A	18,2	81,2
Região B	20,7	79,3

Os valores das frações volumétricas de ferrita e martensita obtidos pela avaliação quantitativa da microestrutura da amostra através dos métodos do padrão linear, reticulado e pontual são apresentados na Tabela 5. A partir deles, realizou-se o tratamento estatístico das medidas para uma probabilidade (P) de 0,95, que de acordo com a Tabela 1 corresponde a um coeficiente de Student (t) de 1,96. corresponde a um coeficiente de Student (t) de 1,96.

Tabela 5 – Valores das frações volumétricas de ferrita e martensita.

		$C_{V(\alpha)}$ (%)	$C_{V(\beta)}$ (%)
Padrão Linear	Região A	15,4	84,6
	Região B	36,4	63,6
Padrão Reticular	Região A	17,6	82,4
	Região B	39,1	60,1
Padrão Pontual	Região A	18,2	81,2
	Região B	20,7	79,3
Tratamento Estatístico	Média	24,6	75,2
	Desvio Padrão	9,5	9,6
	Erro Absoluto	18,6	18,9
	Erro Relativo (%)	75,6	25,1
	Nível de Confiança	24,6±18,6	75,2±18,9

Através do método do gráfico polar, verificou-se que a amostra não possui uma direção preferencial para a orientação dos grãos. A Figura 5 apresenta a aplicação das linhas de teste com espaçamento entre elas de $\Delta\theta=10^\circ$ para duas regiões distintas e a Figura 6 apresenta o gráfico polar gerado de acordo com a contagem do número de grãos interceptados.

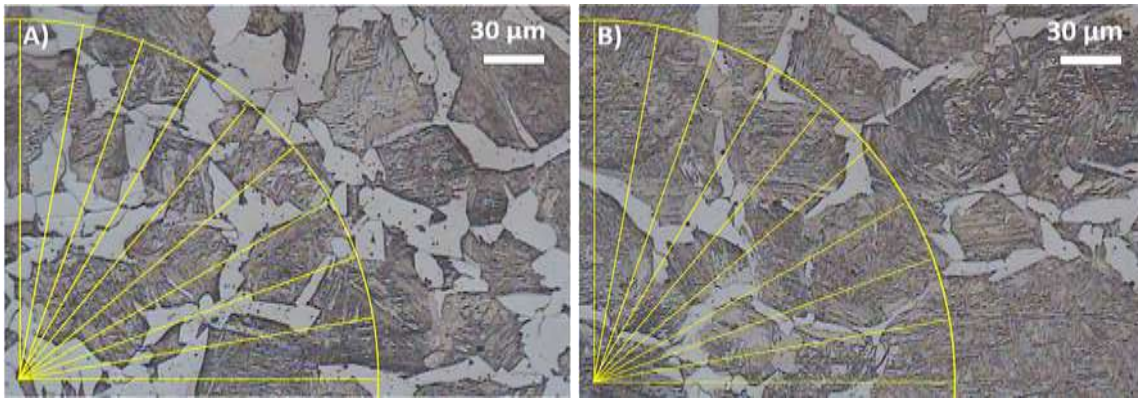


Figura 5 – Aplicação do método do gráfico polar na amostra. Campo claro. Aumento 200x. Ataque Nital 2%

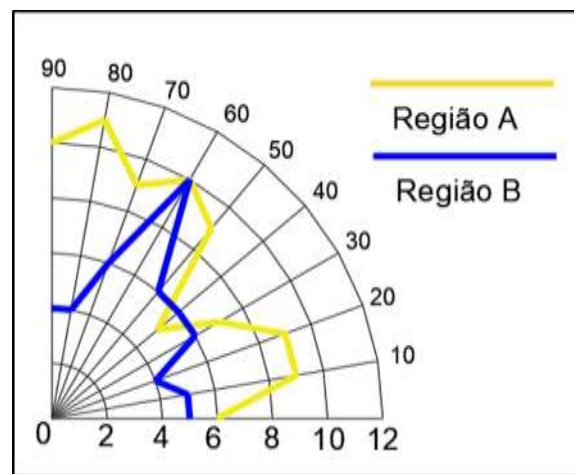


Figura 6 – Gráfico polar da micrografia análise

Os resultados obtidos com o ensaio de microdureza da ferrita e martensita são apresentados na Tabela 6. A partir deles, realizou-se o tratamento estatístico das medidas para uma probabilidade (P) de 0,95, que de acordo com a Tabela 1 corresponde a um coeficiente de Student (t) de 1,96. Os resultados desses tratamentos são exibidos na Tabela 7.

Tabela 6 – Valores de microdureza obtidos na ferrita e martensita. Carga aplicada de 50g.

Ferrita (fase α)			Martensita (fase β)		
L1 (μm)	L2 (μm)	HV (kgf/mm^2)	L1 (μm)	L2 (μm)	HV (kgf/mm^2)
20,92	21,69	204	17,00	16,00	339
21,68	22,28	192	16,18	16,97	337
19,18	19,88	243	17,30	17,11	313
21,10	21,42	205	17,20	17,08	315
20,46	21,37	212	16,97	16,50	331
20,81	20,20	220	16,55	16,86	332

20,50	20,55	220	16,49	16,68	337
20,77	20,75	215	15,79	16,13	364
21,40	20,61	210	17,49	17,25	307
22,60	21,90	187	16,20	16,67	343

Tabela 7 – Tratamento estatístico dos valores de microdureza da ferrita e martensita

Ferrita (fase α)					
Média HV (kgf/mm ²)	Desvio Padrão (kgf/mm ²)	Coefficiente de variação (%)	Erro absoluto (kgf/mm ²)	Erro relativo (%)	Nível de confiança
210,8	15,7	7,4	30,8	14,6	210,8±30,8
Martensita (fase β)					
Média HV (kgf/mm ²)	Desvio Padrão (kgf/mm ²)	Coefficiente de variação (%)	Erro absoluto (kgf/mm ²)	Erro relativo (%)	Nível de confiança
331,8	16,7	5,0	32,8	9,88	331,8±32,8

CONCLUSÃO

Foi constatado que o aço analisado se trata de material com estrutura bifásica, com grãos claros e escuros (sendo este último predominante), não uniformes e sem uma direção preferência, análise preliminarmente obtida de maneira qualitativa e que foi posteriormente confirmada pelo método do gráfico polar. Os grãos claros possuem uma fração volumétrica média de 24,6% com dureza de 210,8 ± 30,8 HV. Já os escuros possuem 75,2% com 331,8 ± 32,8HV. Através de comparações com a literatura disponível, conclui-se então que os grãos claros se trata de ferrita e os escuros de martensita, oriunda do processo de têmpera em água da amostra.

REFERÊNCIAS

- COLPAERT, H.; COSTA, A.L.V. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4ª edição. São Paulo, Blucher, 2008.
- COLPAERT, H.; Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Ed. Edgard Blücher LTDA. Terceira Edição, 1974
- CALLISTER, JR., Willian D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 8a. ed. The University of Utah: LTC, 2012. 821 p. v. 1.
- CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos, 7ª edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e de Materiais – ABM, 2012.
- MATLAKHOV, A.N. Caracterização dos Materiais I. Apostila. 2010. Certidão de Registro no Escritório de Direitos Autorais No 621481. EDA/FBN – Rio de Janeiro.
- ROHDE, R. A., 2010, “Metalografia preparação de amostras. Laboratório de ensaios mecânicos”, 3ª ed., LEMM/URI, Rio Grande do Sul.
- SANTOS, F. G.; MATLAKHOVA, L. A. Caracterização microestrutural e definição do percentual de carbono de um aço por meio da metalografia quantitativa. In: Franciele Bonatto; Henrique Ajuz Holzmann; João Dallamuta. (Org.). Engenharias Mecânica e Industrial: Projetos e Fabricação. 1ed. Ponta Grossa: Atena, 2018, v. 1, p. 23-36.

Capítulo 9



10.37423/220706366

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SCADA PARA UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E SOLARIMÉTRICA USANDO PYTHON

Julia Alves Santos

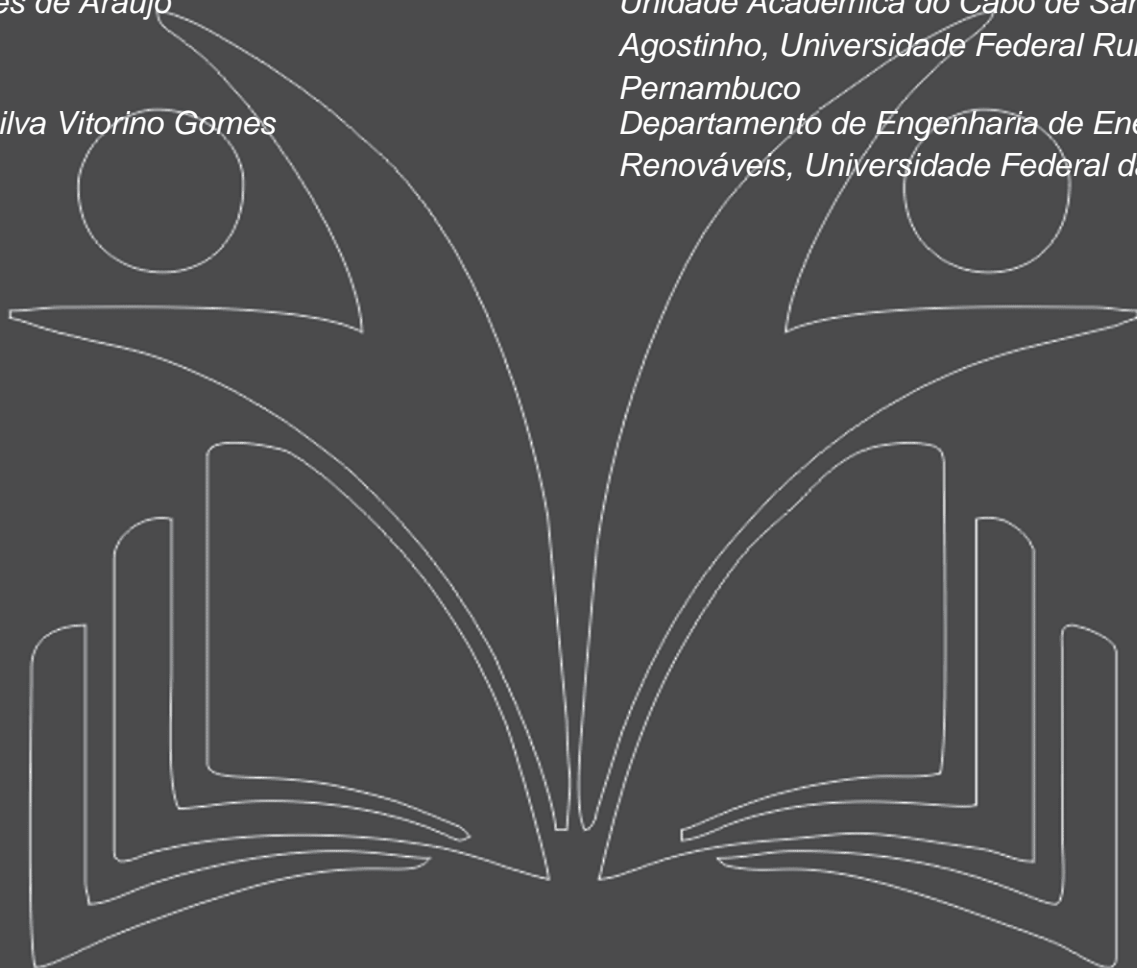
*Departamento de Engenharia de Energias
Renováveis, Universidade Federal da Paraíba*

Marcel Ayres de Araújo

*Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho, Universidade Federal Rural de
Pernambuco*

Flávio da Silva Vitorino Gomes

*Departamento de Engenharia de Energias
Renováveis, Universidade Federal da Paraíba*



Resumo: A diversificação da matriz energética mundial cresceu, ao longo dos anos, com implementação de fontes renováveis de energia, que implica em maior demanda em relação as pesquisas e investimentos na área em questão. O Brasil apresenta um alto potencial de produção energética limpa, especialmente a região Nordeste do Brasil que possui características geográficas significativamente favoráveis para geração de energias renováveis, principalmente a solar e eólica. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas de conversão de energia através de parques solares e eólicos está diretamente relacionado com as condições climáticas, que são caracterizadas pela variabilidade e sazonalidade ao longo das estações do ano. Faz-se necessário o registro histórico das variáveis climáticas e colorimétricas para o levantamento dos potenciais de geração e os impactos dessas variações na produção energética. Diante disso, é essencial a utilização de estações climáticas locais já a existência de microclimas dificulta as generalizações.

Estas estações comerciais, em geral não disponibilizam uma base de dados de longo prazo, estruturada e local como opções de prateleira. Assim, este trabalho teve como finalidade, o desenvolvimento de um sistema de supervisão e aquisição de Dados (SCADA) local, utilizando Python, para a estação de monitoramento de variáveis climáticas e colorimétricas existente no Centro de Energias Alternativas e Renováveis do campus I da Universidade Federal da Paraíba, localizada em João Pessoa, Paraíba.

Palavras-chaves: SCADA; Estação Meteorológica; Estação Solarimétrica; Modbus; Python.

1. INTRODUÇÃO

O progresso que marca a evolução humana está associado ao consumo de bens públicos finitos, como é o caso das fontes de energia. No contexto atual, a geração e o uso de energia é algo essencial para as atividades humanas, entretanto, verifica-se caso uma matriz energética possua sua base em fontes finitas com um elevado potencial poluidor, como é o caso da energia proveniente dos combustíveis fósseis.

Nesse sentido, existe uma preocupação em relação aos efeitos nocivos dessa produção energética, o que está culminando em uma transição para fontes de energia renováveis com objetivo de garantir um desenvolvimento ambientalmente seguro.

Dentre as regiões brasileiras, o Nordeste se destaca na geração de energia elétrica por meio de parques solares e eólicas devido sua localização geográfica, onde a irradiação solar é elevada e a velocidade média do vento apresenta um baixo desvio padrão (Pastor and Macêdo, 2020). Alinhado nesse sentido, o monitoramento das variáveis climáticas e a previsibilidade a respeito da geração de energia em parques solares ou eólicos, possibilita uma melhor administração dos recursos energéticos disponíveis.

As estações meteorológicas monitoram diversas variáveis como, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, direção e velocidade do vento e radiação solar (Paul et al., 2021). A disponibilização dos dados obtidos desse monitoramento, é fundamental para o conhecimento dos potenciais de geração de energia elétrica, gerenciamento de receitas e planejamento operacional, ou seja, garantir a viabilidade da produção energética desejável (Pastor and Macêdo, 2020).

O Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) possui uma estação de monitoramento de variáveis solares e eólicas (velocidade de vento, direção de vento, temperatura ambiente, precipitação, pressão atmosférica, umidade relativa, irradiação direta, difusa e global) do fabricante Ammonit (Ammonit, 2021), que encontra-se instalada nas dependências do CEAR, Campus I , em João Pessoa - Paraíba.

Os dados dessa estação são enviados para o site do fabricante diariamente com dados amostrados a cada 10 minutos do dia anterior, de onde podem ser coletados por meio de usuário e senha ou enviados via e-mails cadastrados previamente. Esta forma de trabalho é funcional, mas apresenta algumas limitações tais como: restrição de acesso a alguns usuários e dependência dos usuários quanto ao sistema ao fabricante (ex.: indisponibilidade do site, recursos e análises pagas, etc). Além

disso, os dados enviados não recebem tratamentos (outliers, mudanças de variáveis, reamostragem, etc).

Assim, visando ampliar o acesso aos dados e sua consequente utilização por pesquisas e estudos relacionados às análises dos dados, o objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema customizado de supervisão e aquisição de dados ou SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), com acesso via rede intranet, com armazenamento local, com banco de dados estruturado, contínuo e independente do fabricante. Além dos dados historiados, serão calculadas médias diárias e apresentação de todos os dados em um painel interativo em formato de dashboard.

O trabalho em questão está estruturado em cinco seções, sendo: (1) Introdução, (2) Fundamentação Teórica, (3) Metodologia e desenvolvimento, (4) Resultados e Discussões e (5) Conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

A Estação Climatológica e Solarimétrica do CEAR é constituída por sensores e um registrador de dados (datalogger modelo Meteo-40 plus da Ammonit). Uma visão geral dos sensores está mostrada na Figura 1. Neste tipo de estação, a configuração dos sensores, visualizações, parâmetros de comunicação e cadastro de usuários é realizada por meio do site do fabricante.

Esta estação possui as seguintes variáveis disponíveis: temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, precipitação, umidade relativa, pressão atmosférica, irradiância solar (global, direta e difusa), além do ângulo da posição solar instantânea. O valor médio, mínimo, máximo e o desvio padrão dessas variáveis são armazenados pelo datalogger com um período de amostragem de 5 segundos.

As medições são realizadas por meio de 8 tipos de sensores (anemômetro, biruta, higrômetro, termômetro, barômetro, pirômetro, pireliômetro e pluviômetro) e um sistema de rastreamento solar.



Figura 1. Estação Climatológica e Solarimétrica do CEAR.

2.2 SCADA

O sistema SCADA apresenta como característica principal, o desenvolvimento de uma interface de alto nível em relação monitoramento e o rastreamento de informações de um processo produtivo ou uma instalação física.

Por intermédio de equipamentos de aquisição de dados, as informações são adquiridas, manipuladas, analisadas e armazenadas pelo sistema. Por fim, as informações são disponibilizadas ao usuário através de telas de monitoramento, alarmes e controle (Paiola, 2012).

Esse sistema permite diferentes configurações e arquiteturas conforme o objetivo da sua utilização. A característica principal do supervisor abordada no desenvolvimento deste trabalho foi o monitoramento, assim, foram adotadas as seguintes funcionalidades: núcleo central de processamento (computador), interface de comunicação com as unidades de terminal remotas (Data Logger/Ammonit), banco de dados, históricos e interface gráfica.

2.3 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

A troca de informações entre diferentes equipamentos é uma das principais características de um sistema SCADA (Simas and Facchin, 2020). Assim, a comunicação para que a transferência de dados ocorra, geralmente é estabelecida através de um protocolo de comunicação padrão como é o caso do Modbus na versão RTU ou TCP.

O protocolo Modbus TCP/IP em sua essência apresenta uma série de vantagens associadas, tais como a junção do Modbus com a transmissão ethernet tradicional que gera um padrão de comunicação industrial de alto nível de execução. Tal padrão, compartilha as mesmas camadas físicas e de enlace

de dados ethernet e utiliza o mesmo suíte de protocolos TCP/IP, mantendo a compatibilidade com a infraestrutura de cabos ethernet já instalada, conectores, placas de rede, etc (Cordeiro, 2019).

Desta forma, considerando que o protocolo de comunicação Modbus TCP é nativo na estação de monitoramento climático do CEAR, a comunicação com a estação foi estabelecida por meio da criação de um cliente na rede interna via este protocolo de comunicação.

2.4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Optou-se por desenvolver o sistema com a utilização do Python, visto que é considerada uma linguagem de programação de alto nível, orientada a objeto, de tipagem dinâmica e forte, interpretada e interativa (Borges, 2014).

Além disso, é uma linguagem amplamente difundida, o que proporciona uma vasta comunidade de usuários, com diversos projetos e contribuições (Python, 2021). Neste projeto, as principais bibliotecas de Python utilizadas foram: Numpy, Pandas, PyMySQL, Dash e PyModbusTCP.

Em relação ao desenvolvimento de códigos, optou-se por trabalhar com o software Visual Studio Code, em virtude de ser caracterizado como um editor de código-fonte leve, porém com um alto nível de expansibilidade. Sendo assim, uma boa opção para a execução das tarefas pretendidas (VSCode, 2021).

No que diz respeito ao ambiente de desenvolvimento web, foi utilizado o Xampp que corresponde a um pacote com os principais servidores de código aberto do mercado. O Xampp é gratuito, fácil de instalar a distribuição Apache, contendo MySQL, PHP e Perl. Assim como o Python, o Xampp também apresenta uma grande comunidade de usuários disposta a contribuir com diversos projetos (Xampp, 2021).

Em relação a visualização e manipulação da arquitetura do banco de dados, optou-se por trabalhar com MySQL

Workbench, dado que ele fornece modelagem de dados, ferramentas abrangentes de administração para configuração do servidor e do design, backup, entre outras facilidades para manipulação dos dados. É caracterizado por ser fácil de se instalar e utilizar, além de dispor de todos os recursos para a criação de modelos mais complexos (Workbench, 2021).

Ademais, com o intuito de garantir a integridade dos códigos, a ferramenta de versionamento de código escolhida para o desenvolvimento do presente trabalho, foi o GitHub, posto que é um serviço

Web de armazenamento e colaboração de códigos amplamente utilizado pela comunidade de programadores (Barbosa and da Silva, 2018). Assim, foi possível agrupar todos os código do trabalho em um único repositório.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema supervisorio foi dividido nas seguintes etapas: i) Definição da Arquitetura do sistema,

ii) Simulações e iii) Aplicação com dados reais. Inicialmente

foi realizado a estruturação dos diversos blocos que compõem o sistema SCADA em questão. Na etapa ii, optou-se desenvolver o sistema SCADA comunicando com um servidor de dados simulado, com intuito de prever prováveis erros e possíveis soluções para a etapa seguinte.

Por fim, na etapa iii) foi a aplicação final, com o datalogger real de dados.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema SCADA foi implementado em um PC dedicado, interligado á rede intranet da universidade, por meio da linguagem de programação Python e contando com 2 (dois) algoritmos rodando em modo contínuo. O primeiro algoritmo é responsável pela requisição dos dados via Modbus TCP/IP ao datalogger da estação meteorológica/ solarimétrica, tratamento e inserção deles no banco de dados local. O segundo algoritmo, realiza consultas nesse banco e apresenta as grandezas analisadas na forma de um dashboard. Cada código possui um período de amostragem fixo de 10 (dez) minutos. A Figura 2, mostra de forma simplificada a arquitetura do supervisorio e os seus principais componentes.

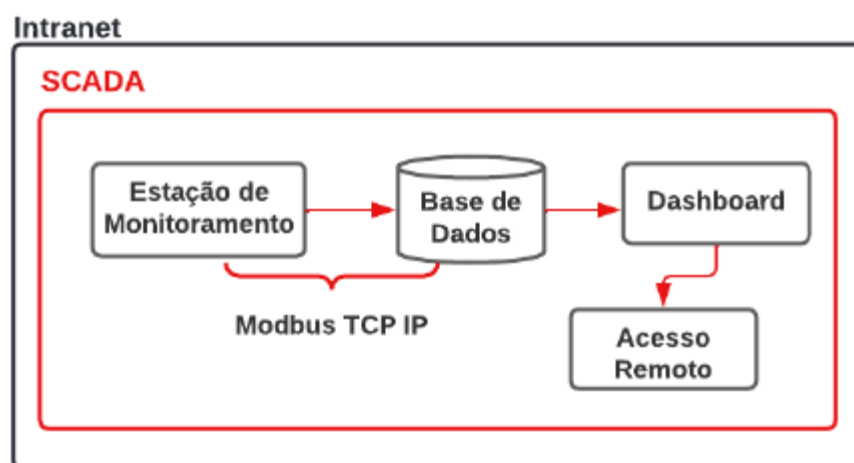


Figura 2. Arquitetura do Supervisorio desenvolvido no projeto.

3.2 SERVIDOR DE DADOS EM SIMULAÇÃO

Inicialmente, foi desenvolvido um sistema simulando as condições reais de operação e comunicação do sistema.

Esse sistema foi elaborado em três etapas, sendo elas: i) Estruturação do Banco de Dados, ii) Comunicação entre componentes iii) Dashboard.

Na primeira etapa, realizou-se a construção de um banco de dados simulando-se os dados fornecidos pela estação CEAR com as seguintes variáveis: temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, precipitação, Irradiação horizontal global (GHI), Irradiância Normal Direta (DNI) e Irradiância Horizontal Difusa (DHI). Na elaboração dessa etapa utilizou-se a biblioteca PyMysql para a estruturação do banco e a visualização e manipulação dos dados foi feita utilizando o MySQL Workbench. Nesta etapa foi avaliada a dinâmica de armazenamento e acesso aos dados pelos outros elementos do sistema SCADA.

Após a estruturação do banco de dados, a etapa de comunicação foi desenvolvida por meio do software simulador Modbus ETH TCP/IP PLC. Este software, disponibilizou dados via protocolo Modbus TCP na rede para que o algoritmos de coleta pudesse ser testado. Para estabelecer a comunicação via protocolo Modbus, fez-se necessário o uso do IP do simulador e o registro das portas utilizadas na requisição dos dados. Os dados simulados do tipo analógico (Float32) foram tratados com a classe ModbusClient da biblioteca PyModbus do Python antes de serem inseridos no banco de dados estruturado.

Na sequência, foi elaborado um dashboard para a exibição dos dados simulados, definindo-se quais variáveis do banco de dados seriam representadas graficamente na aplicação web: velocidade do vento, direção do vento, precipitação, umidade relativa, pressão atmosférica, temperatura ambiente, GHI, DHI e DNI.

3.3 SISTEMA SCADA COM DADOS REAIS

A aplicação final do sistema SCADA foi realizada seguindo as mesmas etapas das simulações.

Primeiramente, o banco de dados foi elaborado, com uma tabela composta por todas as variáveis citadas na fase de simulações. Além disso, os valores referente á média, desvio padrão, máximo e mínimo de cada grandeza foram coletados e inseridos na base de dados.

Na etapa posterior, a comunicação entre o supervisor e o sistema SCADA foi desenvolvida a partir da biblioteca PyModbusTCP. Com a comunicação estabelecida, definiu-se os registros de cada variável do sistema SCADA com os endereço-as (Mapa Modbus) configurado no data_logger via browser no site do fabricante. Assim foi possível fazer a requisição dos dados almejados e seguidamente a inserção dos mesmos no BD.

O tempo de coleta de novos dados no banco foi determinado utilizando como base o período de amostragem de dez (10) minutos, tempo este pré-definido no equipamento AMMONIT durante o comissionamento do mesmo. Este período foi considerado suficiente para realização de análises futuras pelos membros do projeto.

Após a chegada periódica de dados reais aos BD, iniciou-se a elaboração do dashboard para apresentar as variáveis monitoradas de modo claro e conciso. Assim, realizou-se a adaptação do código referente a simulação inicial, que passou a apresentar os gráficos com os valores armazenados no banco de dados da estação de monitoramento climático real. Com o dashboard conectado ao BD do sistema SCADA, optou-se por adicionar informações sobre o valor mínimo, médio e máximo das seguintes variáveis: temperatura velocidade do vento e umidade relativa do ar, a fim de enriquecer a aplicação web desenvolvida. Além disso, fez-se necessário algumas alterações no layout elaborado para etapa de simulação com intuito de ordenar as variáveis monitoradas de modo mais eficiente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento final do trabalho seguiu a sequência descrita na metodologia, iniciando-se pela estruturação do banco de dados. Na Figura 3, temos alguns dados sendo simulados pelo software Modbus ETH TCP/IP PLC durante a etapa de estruturação do banco de dados.

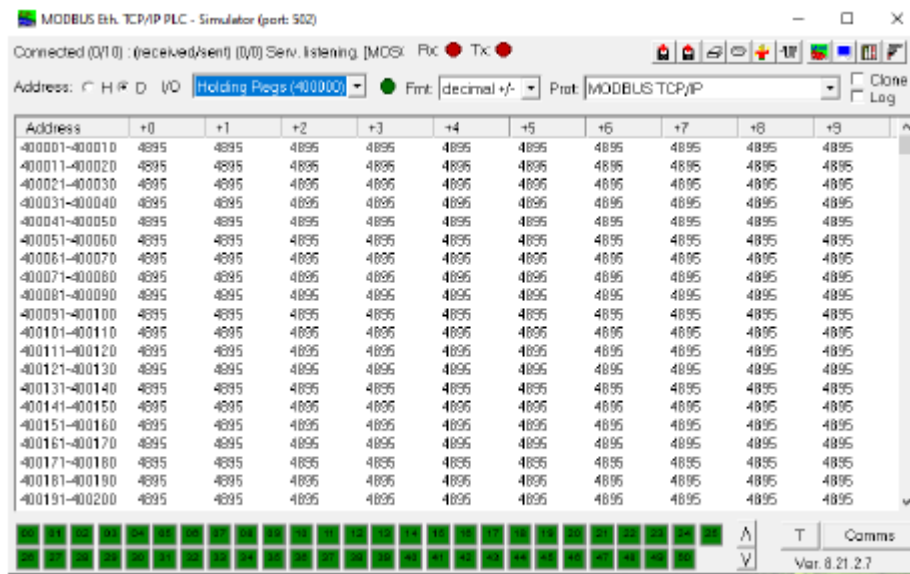


Figura 3. Simulador Modbus TCP.

Na etapa de desenvolvimento inicial do dashboard em simulação, como é possível observar na Figura 4, optou-se pelos seguintes componentes gráficos disponíveis no Dash: Gráfico Gauge para representar a velocidade do vento, Thermometer para temperatura, Histograma 2D para direção do vento, e um conjunto com três displays para umidade relativa, pressão atmosférica e precipitação.

As variáveis relacionadas à irradiância solar (GHI, DHI e DNI) foram representadas em um único gráfico de linhas.

Contudo, após avaliação dos dados reais, houve algumas modificações e o layout final da tela do sistema ficou conforme pode ser visualizado na Figura 5. Nota-se alterações nos tipos de gráficos da direção e velocidade de vento e também na visualização das irradiâncias solares (global, direta e difusa).

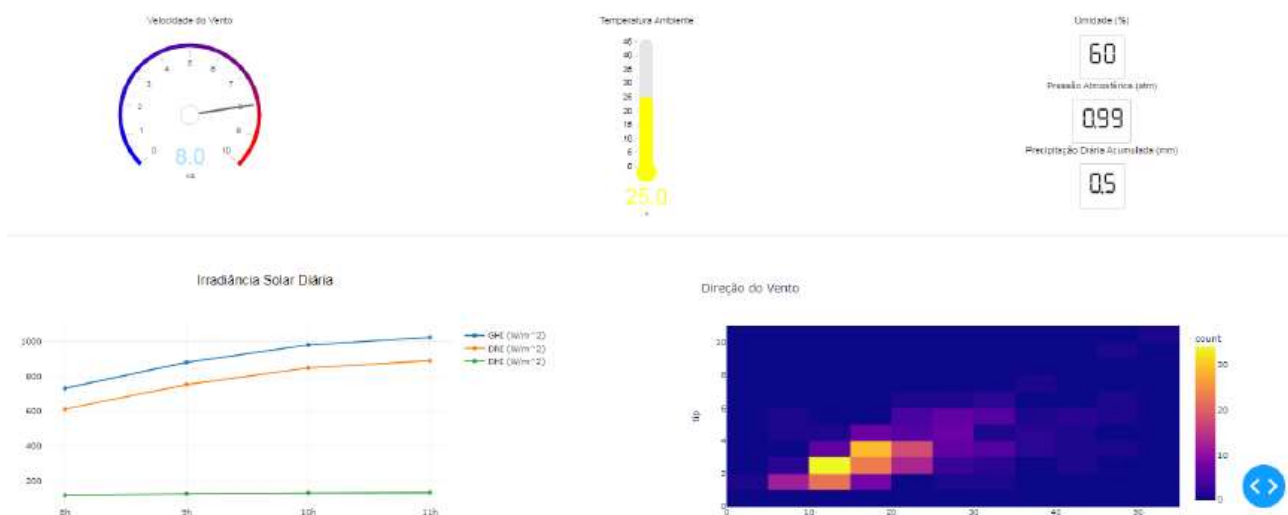


Figura 4. Dashboard com dados simulados.



Figura 5. Dashboard: Versão Atual.

Como mostrado em detalhes nas Figura 6 e 7, as informações referentes á temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar, precipitação e pressão atmosférica passaram a ser representadas por Displays.

Na Figura 8, é possível notar que, para facilitar a visualização da direção do vento optou-se por utilizar o gráfico do tipo Wind Rose Chart da biblioteca Dash do Python.

O gráfico referente á irradiação solar está detalhado na Figura 9, manteve-se como um gráfico de linhas visto que, é possível observar de forma clara a relação das variações de GHI (vermelho), DHI (preto) e DNI (verde) conforme o horário de coleta.

O sistema SCADA foi colocado em produção em Junho de 2021, totalizando um monitoramento de aproximadamente 10 meses e 27293 dados coletados até o momento.

Entretanto, verificou-se a existência de eventos de ausência de dados em virtude de problemas externos relacionados, principalmente á quedas de rede interna e falta de energia elétrica no campus.

O algoritmo referente á requisição dos dados foi desenvolvido para ser alimentado por dados automáticos mas, a ocorrência das interferências citadas anteriormente, resultava em falhas no requerimento dos dados, sendo necessária uma intervenção humana para restabelecer a comunicação. Diante disso, algumas alterações no sistema foram necessárias visando eliminar estas falhas.

Sendo assim, o código de requisição de dados foi melhorado de forma que, assim que receber um dado do tipo NAN (Not a Number) é iniciado um processo de reconexão com a estação de monitoramento, após o restabelecimento da conexão a comunicação é normalizada. Além disso, foi acrescentado um tratamento de possíveis erros com intuito de evitar a queda do sistema. Posteriormente, outra alternativa adotada, foi a integração dos dois algoritmos que rodavam separadamente. Essa estratégia tornou a aplicação Python mais otimizada, reduzindo o tempo de escrita dos dados no banco e conseqüentemente de apresentação das informações coletadas no Dashboard.

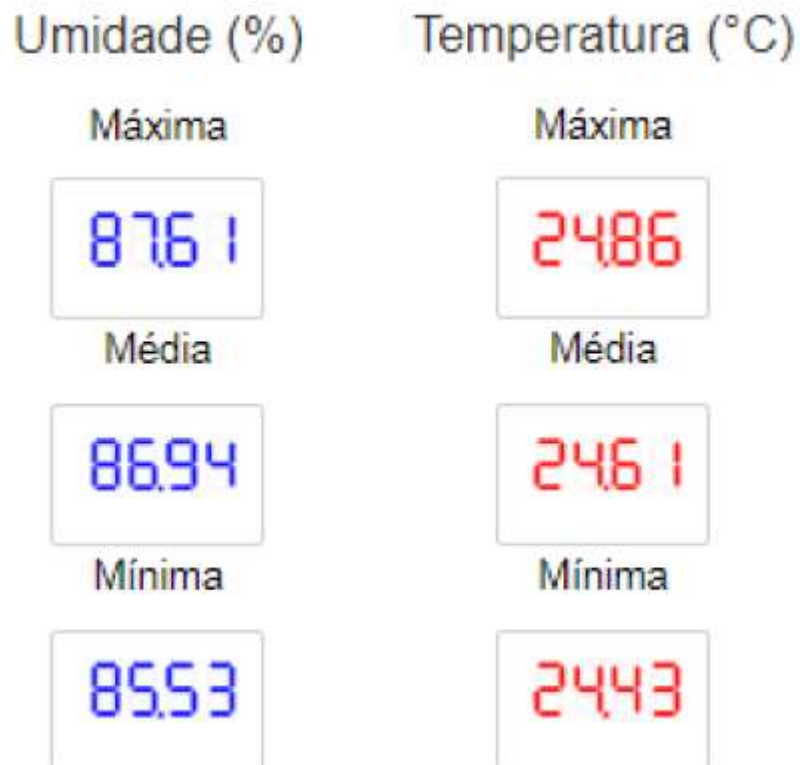


Figura 6. Dashboard: Umidade e temperatura ambientes.



Figura 7. Dashboard: Velocidade do vento, pressão atmosférica e precipitação diária.

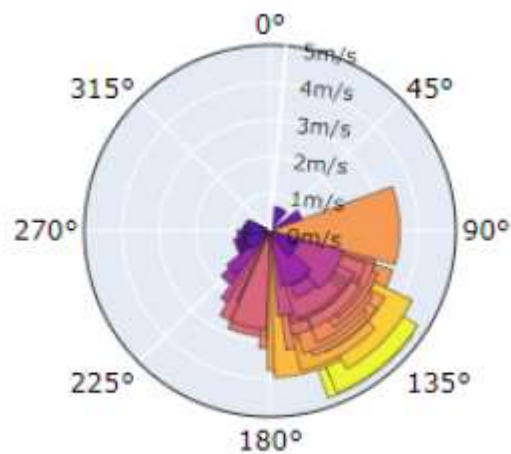


Figura 8. Dashboard: Direção do Vento.

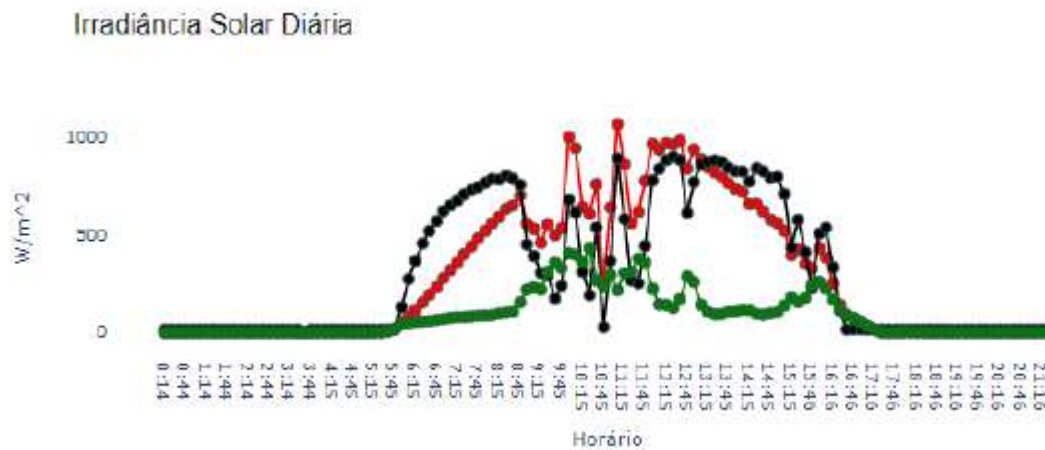


Figura 9. Dashboard: Irradiância solar diária.

Apesar dos dados faltantes, as médias históricas geradas apresentaram valores relativamente próximos quando comparados com as médias fornecidas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para a mesma localidade (INMET, 2022), conforme visualizado na Figura 10. Esta e outras análises podem ser realizadas, pela comunidade universitária, com a facilidade de acesso e manipulação dos dados da estação meteorológica que a implantação deste sistema SCADA trouxe.

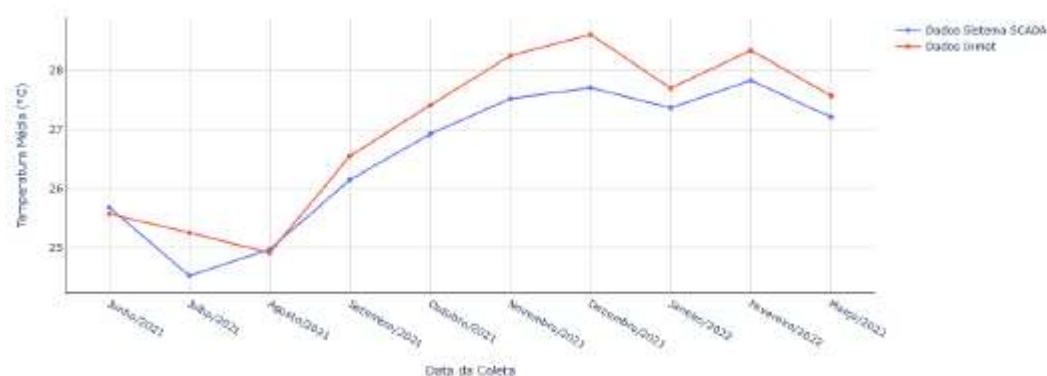


Figura 10. Comparação entre os dados de temperatura do sistema SCADA (azul) e o INMET (vermelho).

Ainda existem desafios a serem vencidos e melhorias no sistema a serem desenvolvidas, mas o trabalho mostrou potencial pois agrega funcionalidades customizadas, gratuita e de fácil implantação para coleta, armazenamento e visualização de dados.

5. CONCLUSÕES

O estudo apresenta uma abordagem estruturada para a construção de um sistema SCADA customizado e totalmente aplicado por meio da linguagem de programação Python para uma estação de monitoramento climático e solarimétrico. Estes dados eram acessados por meio do site do fabricante do equipamento, dificultando, dentre outras coisas, o acesso da comunidade acadêmica às informações adquiridas.

A aquisição dos dados via rede interna da UFPB, a disponibilidade das informações tratadas e customizadas e o desenvolvimento de uma interface web, atinge positivamente a comunidade acadêmica. Assim, é possível expor novos usos em relação à estação de monitoramento climático, já que se torna mais simples e atrativo elaborar estudos a partir do sistema SCADA desenvolvido neste projeto.

É importante ressaltar também, que durante o desenvolvimento do trabalho, a estratégia de definição da arquitetura do sistema e das etapas de simulação foram de suma importância para a exploração das dificuldades no desenvolvimento dos algoritmos principais do projeto (coleta de dados e criação do dashboard), possibilitando uma melhor definição sobre as melhores estratégias para a implantação final do sistema.

Como aspectos de execução, vale à pena comentar que todo o trabalho foi desenvolvido de forma remota devido à pandemia de COVID-19 entre os anos de 2020 e 2021.

Para trabalhos futuros sugere-se um estudo para armazenamento dos dados do banco de dados de modo mais seguro, visto que a quantidade de dados é elevada. Além disso, planeja-se também a conversão do sistema local para uma aplicação em nuvem. Deste modo, possibilitando o acesso aos dados e estudos climáticos à toda a comunidade externa à universidade.

REFERÊNCIAS

- Ammonit (2021). Products. URL <https://www.ammonit.com/en/products/>.
- Barbosa, G.S. and da Silva, E.d.O. (2018). Geração de informações gerenciais para sistemas de controle de versão um estudo de caso utilizado o github. Caderno de Estudos em Sistemas de Informação, 5(1).
- Borges, L.E. (2014). Python para desenvolvedores: aborda Python 3.3. Novatec Editora.
- Cordeiro, J.A.F. (2019). Estudo dos principais protocolos de redes industriais utilizadas no brasil: As-i, modbus e profibus.
- INMET (2022). Banco de dados meteorológicos do inmet. URL <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Paiola, C.E. (2012). O papel do supervisor no atual contexto tecnológico.
- Pastor, J.C.S. and Macêdo, A.V.d.A. (2020). Panorama atual e perspectivas futuras das fontes de energia renováveis intermitentes no nordeste brasileiro. In VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018.
- Paul, S., Dey, T., Saha, P., Dey, S., and Sen, R. (2021). Review on the development scenario of renewable energy in different country. In 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources(52042), 1–2.
- Python (2021). Python 3 Reference Manual. Python Software Foundation. URL <https://docs.python.org/3/>.
- Simas, G.W.d. and Facchin, M.P. (2020). Implementação de um monitoramento remoto com radio lora e modbus tcp/ip. Engenharia Elétrica-Pedra Branca.
- VSCoDe (2021). Visual studio code documentation. URL <https://code.visualstudio.com/docs>.
- Workbench, M. (2021). Mysql workbench. URL <https://www.mysql.com/products/workbench/>.
- Xampp (2021). Xampp apache + mariadb + php + perl. URL <https://www.apachefriends.org/index.html>.

Capítulo 10



10.37423/220706367

PREVISÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM PARQUE SOLAR FOTOVOLTAICO NA PARAÍBA USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS DO TIPO LSTM

Gustavo Basílio Lima

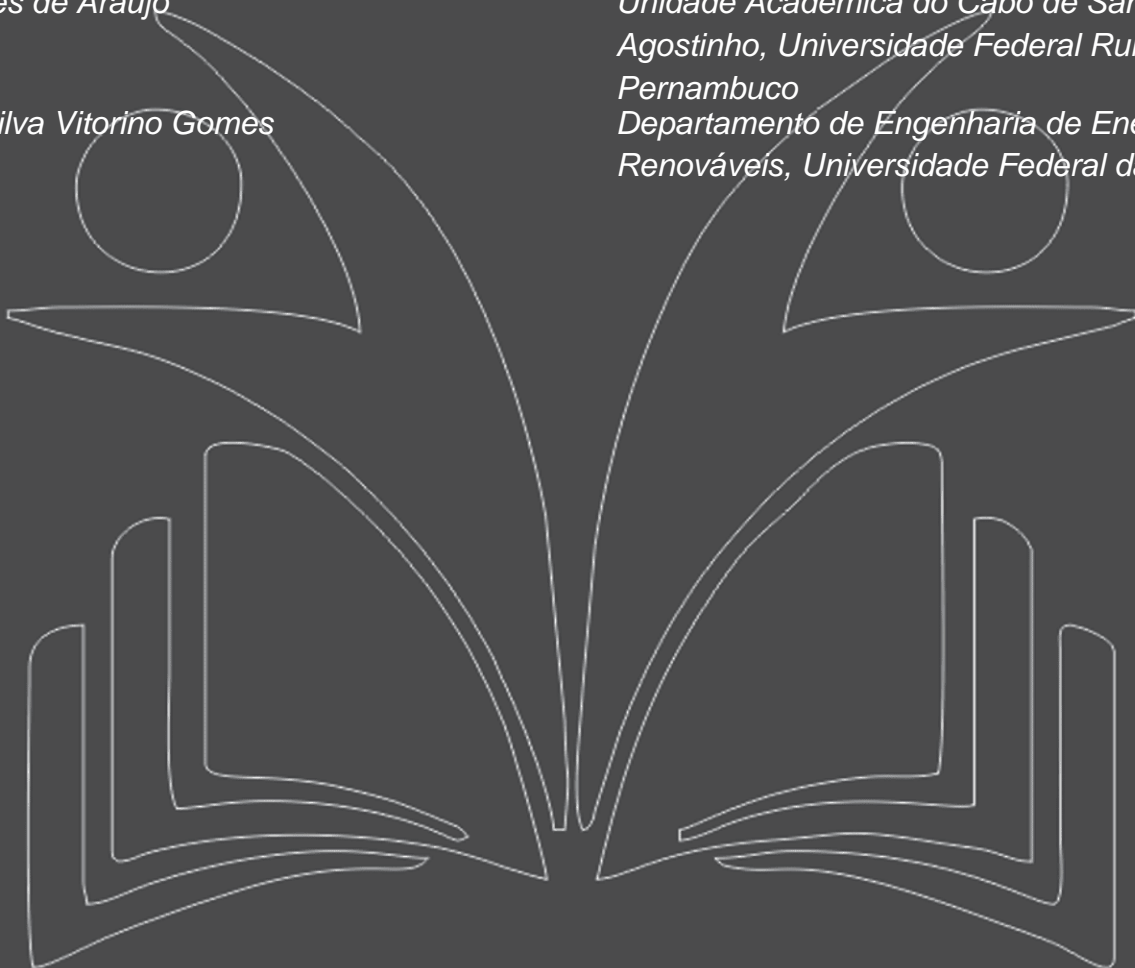
*Departamento de Engenharia de Energias
Renováveis, Universidade Federal da Paraíba*

Marcel Ayres de Araújo

*Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho, Universidade Federal Rural de
Pernambuco*

Flávio da Silva Vitorino Gomes

*Departamento de Engenharia de Energias
Renováveis, Universidade Federal da Paraíba*



Resumo: Após a expansão da oferta de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica no Brasil dos últimos anos, principalmente em virtude da geração distribuída, houve aumento de complexidade das análises de oferta e demanda de energia. A previsibilidade de geração das fontes de energia é um fator de extrema importância para a operação, além de melhorar as análises para expansão da geração, modernização, e planejamento de ações de manutenção e investimentos. O objetivo desse trabalho é a previsão de curto prazo (24 horas à frente) da geração de energia elétrica de um parque solar fotovoltaico utilizando uma rede neural recorrente do tipo LSTM(Long Short Term Memory). O parque solar fotovoltaico que foi utilizado como estudo de caso, está localizado na cidade de Coremas – PB, no alto sertão do estado da Paraíba, encontra-se em operação e é monitorado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Os dados climáticos e Solarimétricos utilizados no trabalho foram coletados das estações meteorológicas terrestres do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e que, após todo o processo de tratamento dos dados, foram gerados e comparados 03 (três) modelos distintos de previsão de geração de energia.

Palavras-chaves: Redes Neurais Artificiais; Previsão; Energia; Geração; Fotovoltaico.

INTRODUÇÃO

No Brasil, entre os anos 2018 e 2019, houve um crescimento de 92, 2% na capacidade de produção de energia solar.

Contudo, esse tipo de energia ainda tem um valor de participação muito baixo na matriz energética nacional. A matriz energética brasileira possui 53,9% do total como fontes não renováveis e 46, 1% como fontes renováveis, sendo que a energia solar representa apenas 0, 196% da matriz como um todo. Isso sinaliza que a oferta de energia solar irá crescer, principalmente pelo fato da evolução da geração distribuída, que no ano de 2019 teve uma alta de 169%, sendo que a maior parcela da geração distribuída (GD) é de energia solar fotovoltaica (cerca de 74, 5%) de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2020).

O modelo de GD, de acordo com a resolução normativa da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) nº 482/2012, se define como a possibilidade da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e cogeração qualificada com empreendimentos com até 5MWde potência instalada, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. De acordo com Ali (2013), as smart grids (redes inteligentes) são descritas como a entrega bidirecional, contínua e instantânea de informações sobre energia, permitindo um melhor controle e gerenciamento de todas as áreas do sistema elétrico de potência (SEP).

Quando uma planta possui uma potência instalada superior a 5 MW, de acordo com a resolução normativa da ANEEL nº 876/2020, ela é enquadrada como Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV) e, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2020), o Nordeste do Brasil é a região que possui a maior potência instalada deste tipo (67, 38% do total) totalizando 1, 98 GW de potência instalada.

Tendo em vista que algumas fontes renováveis de energia tem natureza intermitente, sendo elas principalmente a eólica e a solar, a matriz energética em que elas são inseridas se torna dinâmica com ciclos periódicos. Para isso, técnicas de previsão podem fornecer importantes informações para cálculos e ajustes de balanços energéticos. Existem diversas técnicas para isso, dentre elas estão as redes neurais artificiais (RNAs). As RNAs são ferramentas de modelagem do tipo caixa-preta, que são fornecidos, na fase de aprendizagem, os dados de entrada e suas respectivas saídas futuras (k instantes de tempo à frente), capacitando a rede a buscar uma relação entres estas, e que, na fase de teste, quando os dados de saída não são mais fornecidos, a própria RNA consiga fornecê-los com base nas entradas apresentadas, de acordo com Boussaada et al. (2018) e Faceli et al. (2011). Alguns

trabalhos como, Sözen et al. (2004); Fadare (2009); Fiorin et al. (2011); Solmaz and Ozgoren (2012); Neelamegam and Amirtham (2016); Pang et al. (2020); Mellit and Pavan (2010), apresentam RNAs aplicadas para a previsão de irradiância com arquiteturas que utilizam diversas variáveis como entradas para o sistema sendo as mais comuns: localização (latitude, longitude, altitude), variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa, precipitação, velocidade de vento e pressão atmosférica), temporais (ano, mês e hora) e solarimétricas (horas de sol por dia e fração de nuvens no céu). Nestes trabalhos, há sempre a separação dos dados em pacotes denominados dados para treinamento e dados para validação e utilizam dados coletados de diversas estações de medição terrestres.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de previsão da geração de energia elétrica (em kWh), hora-a-hora até 24 horas à frente, de um parque solar fotovoltaico de 54 MW localizado no sertão da Paraíba, com redes neurais artificiais recorrentes do tipo LSTM, utilizando dados climáticos e solarimétricos de estações terrestres do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), analisando os impactos dos hiperparâmetros nas RNAs e por fim escolhendo o sistema com melhor desempenho baseado em métricas estatísticas.

Este artigo foi dividido nas seguintes etapas: Coleta, análise e tratamento dos dados, modelagem da UFV, definição da estrutura e treinamento da rede neural LSTM e a análise dos resultados de previsão. Todas estas etapas estão descritas nos tópicos seguintes.

2. METODOLOGIA

Nesta seção estão descritos todas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do sistema de previsão de geração de energia elétrica, para 24 horas à frente para a UFV de Coremas-PB.

2.1 COLETA, ANÁLISE E TRATAMENTO DE DADOS

Os dados climáticos e solarimétricos obtidos por estações terrestres têm, em geral, uma exatidão maior em comparação aos dados coletados de satélites devido calibração periódica e por se tratar de medições locais. Contudo, existem limitações de resolução geográfica destas estações devido à baixa disponibilidade em virtude do alto custo de implantação e manutenção destas, de acordo com Júnior et al. (2020).

Dentre os bancos de dados possíveis para obtenção (domínio público), foi escolhido a do INMET (2020), que é gerido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, e por meio dele são fornecidos dados de estações terrestres ao longo de todo o Brasil.

Na Figura 1 pode-se ver a distribuição das estações ao longo do território paraibano, sendo que na Tabela 1 temos mais informações sobre estas. Na Paraíba, são 11 estações divididas entre automáticas (sistema de coleta automático) e convencionais (coleta manual).

Como se pode notar, não há estação terrestre próxima à Coremas (marcador marrom). Sendo assim, para a obtenção desses dados foi utilizado o método da interpolação pelo inverso da distância (inverse distance weighting) utilizando-se os pontos (latitude e longitude) das estações nos arredores da UFV, e suas respectivas propriedades, conseguindo-se definir os pesos para a interpolação. Neste método, quanto mais próxima a estação do local a ser interpolado, maior será o peso desta nos parâmetros da média ponderada, segundo Gholipour et al. (2013).



Figura 1. Localização das estações do INMET e da UFV na Paraíba.

Com base na revisão bibliográfica realizada, decidiu-se pela utilização de 17 variáveis climáticas/solarimétricas mais utilizadas e que existiam na base de dados do INMET como entradas do sistema de previsão com redes neurais e a saída do sistema foi definida como a energia gerada em kWh. A relação de variáveis de entrada pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 1. Estações climatológicas na Paraíba.

Nome	Latitude	Longitude	Tipo
JOÃO PESSOA	-7,09°	-34,85°	Convencional
JOÃO PESSOA	-7,16°	-34,82°	Automática
CAMARATUBA	-6,56°	-35,13°	Automática
AREIA	-6,97°	-35,72°	Convencional
CAMPINA GRANDE	-7,22°	-35,90°	Convencional
CABACEIRAS	-7,48°	-36,29°	Automática
MONTEIRO	-7,89°	-37,12°	Convencional
PATOS	-7,05°	-37,27°	Convencional
PATOS	-7,08°	-37,27°	Automática
ITAPORANGA	-7,32°	-38,14°	Automática
SÃO GONÇALO	-6,89°	-38,31°	Convencional

Tabela 2. Variáveis de entrada do sistema de previsão.

Variável	Unidade
Precipitação total	<i>mm</i>
Pressão atmosférica ao nível da estação	<i>mB</i>
Pressão atmosférica máxima	<i>mB</i>
Pressão atmosférica mínima	<i>mB</i>
Radiação Global	<i>MJ/m²</i>
Temperatura do ar de bulbo seco	<i>°C</i>
Temperatura do ponto de orvalho	<i>°C</i>
Temperatura máxima	<i>°C</i>
Temperatura mínima	<i>°C</i>
Temperatura do ponto de orvalho máxima	<i>°C</i>
Temperatura do ponto de orvalho mínima	<i>°C</i>
Umidade relativa do ar	<i>%</i>
Umidade relativa máxima	<i>%</i>
Umidade relativa mínima	<i>%</i>
Direção do vento	<i>°</i>
Rajada máxima do vento	<i>m/s</i>
Velocidade do vento	<i>m/s</i>

2.2 MODELAGEM DA UFV

Este trabalho utilizou, como estudo de caso, o parque solar fotovoltaico localizado na cidade de Coremas, no sertão do estado da Paraíba, que possui uma potência instalada de 54 MW (unidades de geração 1 e 2). Sua operação foi iniciada no segundo semestre de 2018 estando este parque conectado à rede básica em 230 kV e está integrado ao Sistema Interligado Nacional - SIN ONS (2020). Sendo assim, para este parque solar, pode-se obter a média da geração de energia real ao longo do tempo além de outras informações públicas.

As plantas do complexo são formadas, cada uma, por 95.760 painéis fotovoltaicos do modelo GCL – P6/72 325 Wp distribuídos em arranjos em série (strings) e paralelos que operam com uma tensão máxima de saída de 966 Vcc por string. Estas, por sua vez, são interligadas em caixas de junção (string box) e conectadas aos inversores da subestação do parque solar. Nesta subestação, são utilizados inversores da WEG do modelo SIW700 com uma tensão de saída de 360 Vca trifásica. O transformador eleva a tensão para 34, 5 kV para transmissão até a subestação da rede básica da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) onde esta tensão é novamente elevada para 230 kV e conectada à rede básica como pode ser visto na Figura 2, conforme descrito em Diniz (2018).

2.3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Existem diversas ferramentas matemáticas que podem ser utilizadas para previsões de irradiância solar: Gómez and Casanovas (2003) usaram lógica fuzzy, Reda and Andreas (2004) utilizaram um algoritmo a partir da posição solar

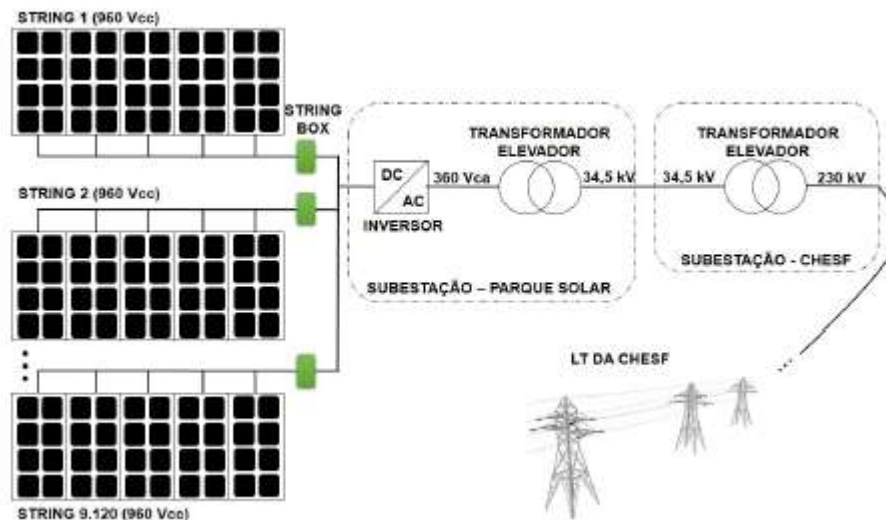


Figura 2. Esquema da UFV de Coremas - PB.

e Persson et al. (2017) usou o modelo gradient boosted regression tree. Além destas, existem vários outros tipos de ferramentas usadas para previsões de irradiância solar, tais como: modelos auto-regressivos e de médias móveis, variáveis exógenas, neurônio linear adaptativo, etc, conforme mostrado em Inman et al. (2013).

Neste trabalho foi utilizado modelos de previsões com RNAs que, de acordo com Fiorin et al. (2011), são sistemas paralelos e distribuídos constituídos de unidades simples.

Já Boussaada et al. (2018), as define como estruturas que possuem uma poderosa capacidade de aprender, armazenar e relembrar informações, de maneira similar aos neurônios humanos.

Nas RNAs, as unidades de processamento fundamental são os neurônios artificiais, que são arranjados por camadas e interligados por múltiplas conexões (geralmente unidirecionais).

Essas conexões simulam sinapses biológicas, significando que cada conexão possui um peso onde a informação de entrada vem a ser ponderada, e esses pesos têm valores ajustados em um processo de aprendizagem. Na Figura 3 é apresentado o esquema de um neurônio que recebe uma informação de natureza numérica, esse valor é ponderado, comparado com um gatilho (bias) e atravessa uma função

de ativação, sendo a saída desta função a resposta do neurônio para sua excitação inicial, de acordo com Faceli et al. (2011).

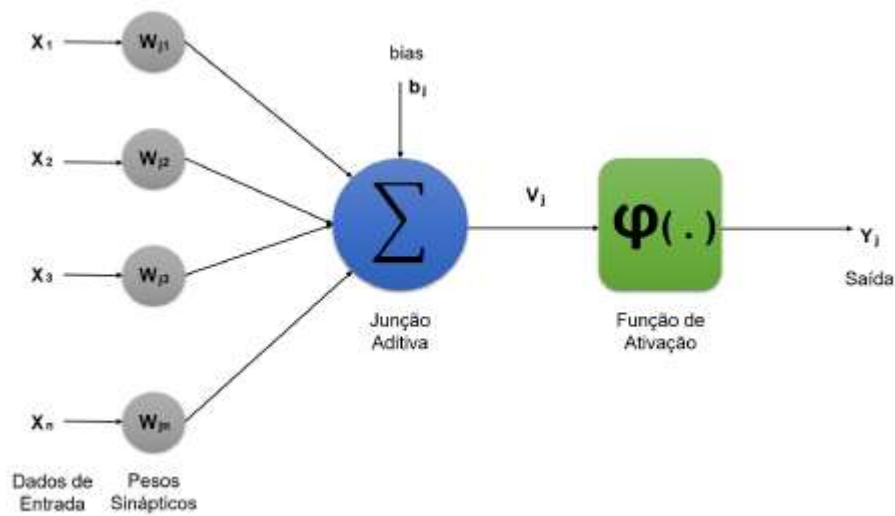


Figura 3. Representação de um neurônio artificial.

Existem diversos arranjos desses neurônios para se ter uma RNA, como mostrado por Fiorin et al. (2011), sendo que um dos modelos bastante utilizados é o perceptron de múltiplas camadas (Multilayer Perceptron - MLP), como pode ser visualizado na Figura 4. Este arranjo é um dos arranjos mais intuitivos, tendo como característica a alimentação direta entre as camadas de neurônios, sendo uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermediárias (ou ocultas) e uma camada de saída.

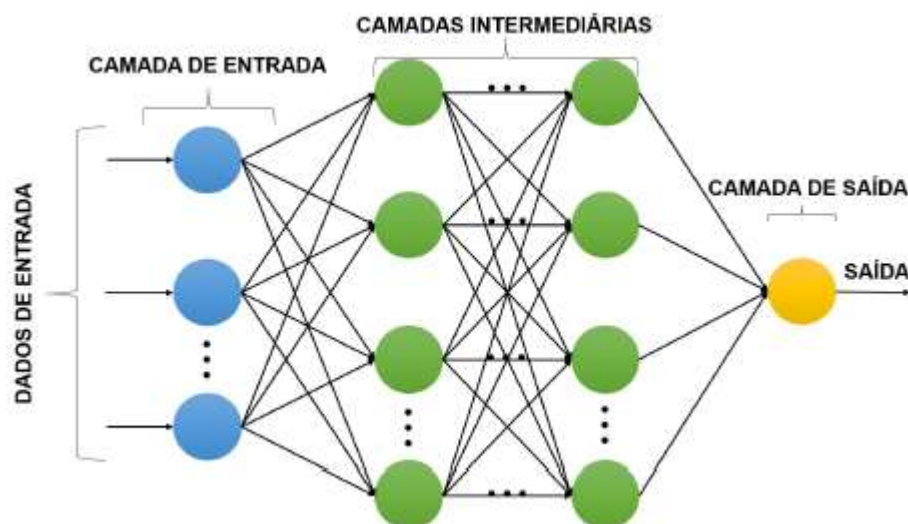


Figura 4. Representação de uma rede neural artificial do tipo MLP.

As RNAs são ferramentas matemáticas poderosas que operam com um grande número de funções matemáticas podendo ser simples ou complexas, de natureza linear ou não. No processo de previsão

de séries temporais com RNAs, primeiramente é necessário criar um dataset (pacote de dados) de treinamento com as entradas e saídas desejadas, definir o tipo, configuração das estruturas internas da RNA, critérios para treinamento e avaliação dos erros de previsão, como apresentado em Loy (2019).

Já na fase de teste, é utilizado um dataset apenas com os dados de entrada, quando o próprio sistema fornece os dados de saída e comparam-se os resultados com os dados reais. No caso do processo de treinamento ser realizado com sucesso, e ainda assim na fase de teste os resultados obtidos estão mais próximos aos dados utilizado para o treino ao invés dos dados reais, denomina-se isto de *overfitting*, que é quando a RNA decorou a relação entrada e saída e se tornou incapaz de generalizar, o inverso disso é denominado como *underfitting*, que é quando já na fase de treinamento o desempenho da rede é baixo, conforme relata Müller and Guido (2016). Um exemplo prático mostrado em Loy (2019), é a utilização de dados médicos de pessoas diabéticas e não diabéticas, após todas as fases realizadas o sistema tem a capacidade de receber as informações das pessoas no geral e após o processamento dos dados consegue determinar se essa pessoa tem diabetes ou não.

As redes neurais do tipo memória longa de curto-prazo (LSTM, long short-term memory) são baseadas em redes neurais recursivas, utilizando informações temporais como dados de entrada. As LSTMs possuem uma estrutura especial de neurônios chamadas células de memória, cuja finalidade é armazenar informações por um período arbitrário. Há três portas que controlam o fluxo de dados para dentro e para fora da célula de memória do neurônio: portas de entrada, saída e esquecimento. Cada porta tem uma alta relação com a função de ativação, ou seja, se a porta de entrada observar uma ativação alta, a entrada será armazenada na célula de memória, já se a porta de saída tiver uma alta ativação, ele liberará as informações armazenadas para os próximos neurônios, e por fim caso a porta de esquecimento notar uma alta ativação, a célula de memória será apagada. A principal diferença no treinamento de um LSTM em contraste com um MLP é que, para prever um valor em um instante de tempo na LSTM, as amostras anteriores também devem ser propagadas pela rede Gensler et al. (2016).

A utilização de redes neurais artificiais como ferramenta para a previsão de séries temporais de variáveis climáticas e solarimétricas é bem usual. Uma vantagem das RNAs em relação às técnicas tradicionais utilizadas para previsão é sua estrutura flexível e que elas podem aprender padrões lineares ou não-lineares em séries temporais e prevê-los com precisão em casos que as técnicas tradicionais falham, segundo Müller and Guido (2016).

Na concepção e treinamento das RNAs existem parâmetros que devem ser escolhidos e que impactam diretamente no desempenho da rede e que recebem o nome de hiperparâmetros. Essas hiperparâmetros podem ser divididos em (I) parâmetros de arquitetura da rede, (II) parâmetros para evitar overfitting, (III) parâmetros de aprendizagem, (IV) parâmetros de pré-processamento e (V) parâmetros de inicialização de peso. Portanto, é de suma importância para o desempenho do modelo preditivo analisar o impacto destes perante seus resultados, conforme mostrado por Hutter et al. (2015).

As variáveis de saída do sistema de previsão usando RNAs do tipo LSTM utilizado neste trabalho são as previsões da energia gerada (EG em GWh) a partir das radiações globais previstas (RG em kJ/m²). Estas previsões são disponibilizadas, a cada hora, para até 24 horas a frente, totalizando assim 24 saídas para o sistema.

2.4 MÉTRICAS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Em problemas de regressão, pode-se analisar os resultados obtidos pelos modelos preditivos utilizando diferentes métricas. O conceito básico de avaliação de previsão na análise de regressão é comparar o valor original com o previsto.

Algumas dessas métricas que foram utilizadas nesse trabalho são: Erro médio absoluto (Mean Absolute Error - MAE), erro meio quadrático (Mean Squared Error - MSE), raiz do erro médio quadrático (Root Mean Squared Error - RMSE) e erro logarítmico médio quadrático (Mean Squared Logarithmic Error - MSLE) que aparecem matematicamente nas equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente, sendo y_i os valores reais, \hat{y} os previstos e N o número de amostras dos dados Botchkarev (2017).

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}| \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2} \quad (3)$$

$$MSLE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (\log(y_i + 1) - \log(\hat{y} + 1))^2 \quad (4)$$

3. RESULTADOS

O desenvolvimento de uma ferramenta de previsão de geração de energia elétrica de um parque solar fotovoltaico possibilita melhorar as análises para expansão da geração, modernização, e planejamento de ações de manutenção e investimentos. Os procedimentos apresentados a seguir constituem, de forma sequencial, o uso das várias técnicas descritas na Seção II. O trabalho foi executado utilizando-se como estudo de caso um parque solar fotovoltaico de grande porte localizado no município de Coremas-PB.

Este parque solar fotovoltaico está localizado no sertão paraibano na latitude: 6°59' 57' ' sul e longitude: 37°56' 7" oeste. As estações terrestres de monitoramento climático do INMET mais próximas de Coremas encontram-se nos municípios de Itaporanga-PB, Patos-PB e Sousa-PB (estação localizada no distrito de São Gonçalo), conforme descrito anteriormente.

Todas as etapas de desenvolvimento deste sistema foram realizadas utilizando-se a linguagem de programação Python e suas bibliotecas.

3.1 COLETA DE DADOS

Inicialmente foram coletados os dados das estações terrestres do INMET nos municípios paraibanos de Patos, Sousa e Itaporanga. Estes dados foram coletados de 2007 a 2020 (de acordo com a disponibilidade da base) com uma período de amostragem de 1 (uma) hora. As variáveis climáticas coletadas das estações foram: precipitação total (mm), pressão atmosférica ao nível da estação (mB), pressão atmosférica máxima (mB), pressão atmosférica mínima (mB), radiação global (kJ/m²), temperatura do ar de bulbo seco (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), temperatura do ponto de orvalho máxima (°C), temperatura do ponto de orvalho mínima (°C), umidade relativa do ar (%), umidade relativa máxima (%), umidade relativa mínima (%), direção do vento (o), rajada máxima do vento (m/s) e velocidade do vento (m/s) através do site do INMET (2020).

3.2 TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento dos dados se tornou necessário devido a necessidade de criação de base única e a existência de dados faltantes. O primeiro passo foi identificar como estes dados são apresentados, sendo que alguns aparecem como -9999 e outros como NaN (not a number). Além disso, no caso da variável radiação global estes aparecem como 0s (zeros), tanto para os horários em que não há ocorrência (noite e início da manhã) como para os dados ausentes.

No dataset, foi possível verificar que há de 3 (três) horas (GMT + 0), já que o horário com maior temperatura é 15 : 00 horas, ao invés de ser 12 : 00 horas. Sendo assim, realizamos a correção da hora para o GMT - 3.

Como os dados do tipo NaN não impactam nas análises estatísticas por serem ignorados, decidiu-se padronizar todos os dados faltantes para este formato. Sendo assim, os períodos de dados ausentes das estações terrestres de São Gonçalo (Sousa) e Itaporanga foram preenchidos para que fiquem do mesmo tamanho dos dados da estação de Patos (maior dataset). Após esse processo, para cada variável, existem 114.240 linhas totalizando 2.056.320 de dados em uma mesma base integrada.

3.3 INTERPOLAÇÃO DOS DADOS

O próximo passo foi a realização da interpolação dos dados das 3 estações terrestres do INMET referentes aos municípios de Itaporanga, Sousa e Patos-PB. Conforme citado anteriormente, optou-se pela obtenção dos dados para Coremas pelo método da interpolação pelo inverso da distância (IDW) em relação às três estações existentes.

Este método consiste no cálculo da média ponderada da nova localização com base nos pesos encontrados a partir dos inversos das distâncias entre as estações e Coremas.

Utilizando-se as latitudes e longitudes das estações terrestres e do parque solar analisado, sendo pCI, pCSG e pCP os pesos das estações de Itaporanga, São Gonçalo e Patos, respectivamente, e associados da forma como pode ser vista nas equações (5), (6) e (7).

$$\begin{aligned} -7.318611 \times p_{CI} - 6.756667 \times p_{CSG} - 7.079722 \times p_{CP} \\ = -6.96325 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -38.140833 \times p_{CI} - 38.227500 \times p_{CSG} - 37.2725 \times p_{CP} \\ = -37.999128 \end{aligned} \quad (6)$$

$$p_{CI} + p_{CSG} + p_{CP} = 1 \quad (7)$$

Assim, cada peso foi calculado via regra de Cramer, inicialmente organizada como mostrada na equação (8) dando como resultado os valores mostrados na equação (9).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -7.318611 & -6.756667 & -7.079722 \\ -38.140833 & -38.227500 & -37.2725 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{CI} \\ p_{CSG} \\ p_{CP} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} -6.963257 \\ -37.999128 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} p_{CI} = 0,2428 \\ p_{CSG} = 0,5401 \\ p_{CP} = 0,2171 \end{cases} \quad (9)$$

Esta média ponderada obtida pelo método IDW foi comparada com a interpolação pela média aritmética das latitudes e longitudes, como mostrado na Figura 5. Nota-se que há uma divergência que é oriunda dos diferentes pesos utilizados nesses cálculos, quando é calculado através da média aritmética, considerando-se que todos os pesos são iguais ($p_{CI} = p_{CSG} = p_{CP} = 0,33$). Ainda na Figura 5, tem-se as localizações das 3 estações terrestres do INMET, do parque solar (Coremas - UFV) e das localizações das medidas quando utilizamos as médias aritmética (Coremas - MA) e ponderada pelo IDW (Coremas - MP).



Figura 5. Localizações das estações, da UFV, e a partir das médias aritmética e ponderada pelo IDW.

Com bases nos pesos do método IDW, foi realizada a geração da base de dados interpolada para o município de Coremas que foi utilizado no modelo de previsão com RNA.

Na sequência, com base nos dados interpolados, avaliou-se o perfil de irradiação da localidade de Coremas-PB. A partir da irradiância (em kWh/m²), que pode ser obtido dividindo por 3600 cada medição da radiação global (em kJ/m²), pode-se estimar o potencial para a geração do parque solar fotovoltaico. Para a região de Coremas-PB, pode-se ver os valores médios mensais (em kWh/m²/dia) na Figura 6, condizentes com o esperado para a região.

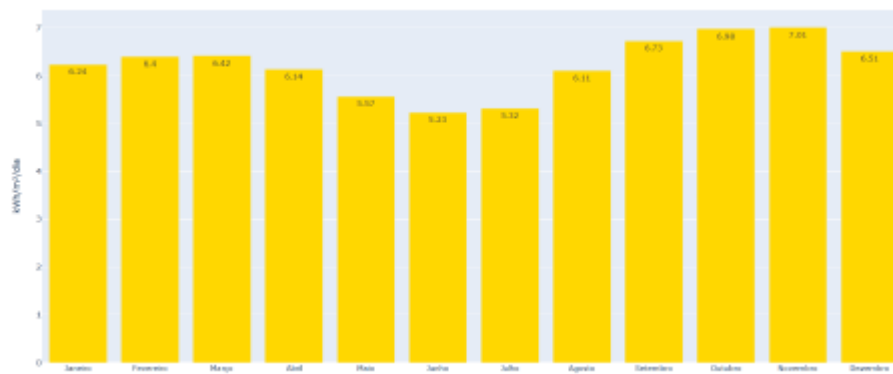


Figura 6. Médias históricas mensais da irradiação, em Coremas, a partir dos dados do INMET.

A etapa seguinte foi, com base na irradiação da região e na capacidade instalada do parque solar fotovoltaico, realizar os cálculos para estimar a energia gerada pela planta através das equações (10), (11) e (12).

$$E = \epsilon \times A \times I \times N \times \eta \quad (10)$$

$$\eta = 1 - \sum \text{Perdas} \quad (11)$$

$$\sum Perdas = P_S + P_P + P_R + P_T + P_{CB} + P_{CX} \quad (12)$$

Sendo E a energia gerada em kWh, ϵ a eficiência dos módulos, A a área do módulo em m^2 , I a irradiação solar em kWh/m^2 , N o número de módulos, η a relação entre as perdas e os ganhos externos, P_S as perdas por sombreamento, P_P as perdas por poeira, P_R as perdas pro reflexão, P_T as perdas pela temperatura, P_{CB} as perdas através dos cabos e P_{CX} as perdas através das conexões.

Os módulos utilizados na UFV possuem 1956 mm de comprimento, 992 mm de largura, e a eficiência é quantificada em 16,7%. As perdas externas associadas são estimadas em 3% cada.

Quanto ao seguidor solar (sun tracker), de acordo com Ordóñez et al. (2018), quando se é utilizado o seguidor solar de um único eixo, o ganho pode chegar até 27%. No entanto, este ganho não é aplicado para todos os horários, apresentando-se ganhos maiores em horas próximas ao início e ao fim do dia, fazendo com que a curva característica da energia ao invés de ser no formato de sino fica com um formato mais próximo ao trapézio, essa distribuição pode ser melhor apresentada na Figura 7, onde foi utilizado um ganho médio estimado de 23,35%.

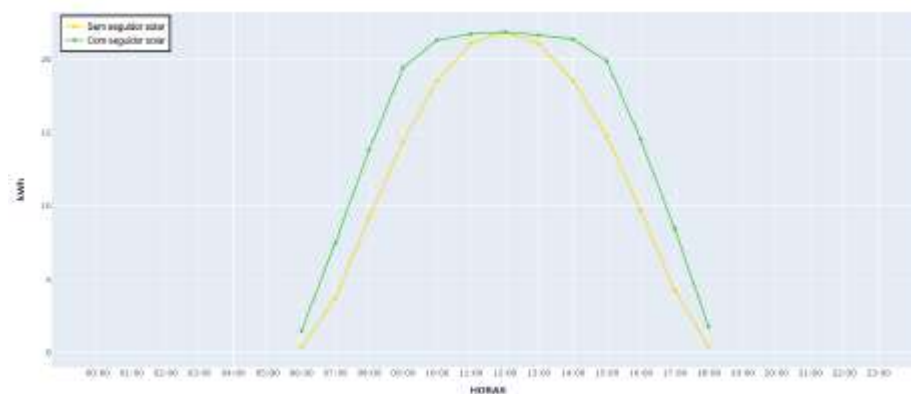


Figura 7. Médias históricas horárias da energia estimada gerada, com e sem seguidor solar para a UFV.

3.4 NORMALIZAÇÃO DOS DADOS

Quando se trabalha com RNAs, é aconselhável que os dados utilizados como entrada tenham faixas de variações próximas entre as variáveis. Uma das formas de se fazer isso é normalizar o dataset e esta ação afeta diretamente o desempenho do sistema, segundo Sola and Sevilla (1997).

Isso ocorre pela natureza dos parâmetros internos da rede, tais como os pesos sinápticos (que variam de -1 a 1) e a função de ativação (que neste caso varia em um intervalo de 0 até 1). No processo de

inicialização, quando os pesos são distribuídos aleatoriamente, quanto maior o valor dessas variáveis, mais o sistema irá fazer ajustes bruscos desses pesos, podendo afetar negativamente a acurácia final do modelo.

O procedimento de normalização realizado foi o exposto por Eesa and Arabo (2017), onde é analisada a série temporal (unicamente para as parcelas de treinamento, validação e teste) e para cada valor único há a subtração pelo valor mínimo de toda a série e dividido pela subtração do valor máximo com o valor mínimo de toda a série temporal, como pode ser visto na equação (13).

$$x_k = \frac{x_i - X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (13)$$

3.5 MODELOS DE PREVISÕES

Foram desenvolvidos 10 modelos com variações nos hiperparâmetros para avaliação comparativa de resultados.

Todos os modelos foram treinados com 100 épocas e utilizando as mesmas funções de ativação nas camadas ocultas (tanh) e na camada de saída (sigmoid).

As mudanças dos hiperparâmetros ocorreram no número de camadas ocultas (COs), número de neurônios nas Cos e no algoritmo do otimizador. Contudo, para este último parâmetro, a literatura mostra que o ADAM (Adaptative Moment Estimation – Estimativa de Momento Adaptável) é o mais utilizado e obtém, em geral, os melhores resultados para este tipo de RNA. Assim, 10 modelos foram avaliados com as métricas citadas na seção II. Os resultados destes treinamentos encontram-se a seguir:

- Modelo 1: 2, 24 – 24, ADAM e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0553, 0,0162, 0,1272 e 0,0078, respectivamente.
- Modelo 2: 2, 168 – 24, ADAM e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0404, 0,0061, 0,0781 e 0,0026, respectivamente.
- Modelo 3: 2, 168–168, ADAM e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0472, 0,0091, 0,0954 e 0,0040, respectivamente.

- Modelo 4: 2, 168 – 168, RMSProp e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0561, 0,0139, 0,1179 e 0,0063, respectivamente.
- Modelo 5: 3, 168 – 24 – 168, ADAM e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0393, 0,0060, 0,0775 e 0,0026, respectivamente.
- Modelo 6: 3, 168–168–168, RMSProp e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0434, 0,0075, 0,0865 e 0,0031, respectivamente.
- Modelo 7: 3, 168–168–168, ADAM e sem dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0337, 0,0041, 0,0638 e 0,0017, respectivamente.
- Modelo 8: 3, 168–168–168, ADAM e 10% de dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0321, 0,0039, 0,0628 e 0,0017, respectivamente.
- Modelo 9: 3, 168–168–168, ADAM e 15% de dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0673, 0,0283, 0,1683 e 0,0147, respectivamente.
- Modelo 10: 3, 168 – 168 – 168, ADAM e 20% de dropout, tendo como MAE, MSE, RMSE e MSLE os valores 0,0440, 0,0097, 0,0985 e 0,0047, respectivamente.

Pelos desempenhos dos modelos apresentados, constata-se que o modelo 8 apresentou os menores erros de previsão quando utilizado o dataset de teste. Este modelo usa 3 camadas ocultas (168 neurônios por camada), otimizador ADAM e dropout de 10%. Sendo assim, este modelo foi escolhido para as avaliações subsequentes.

Na Figura 8, tem-se a previsão de 24 horas à frente do Modelo 8 e os valores reais para o dataset de teste, totalizando 1 ano (de julho de 2019 até julho de 2020).

Na Figura 9, encontram-se as previsões de 5 dias e seus respectivos valores reais. Nota-se que a previsão se mostra coerente apesar de haver, em alguns momentos erros de maior magnitude.

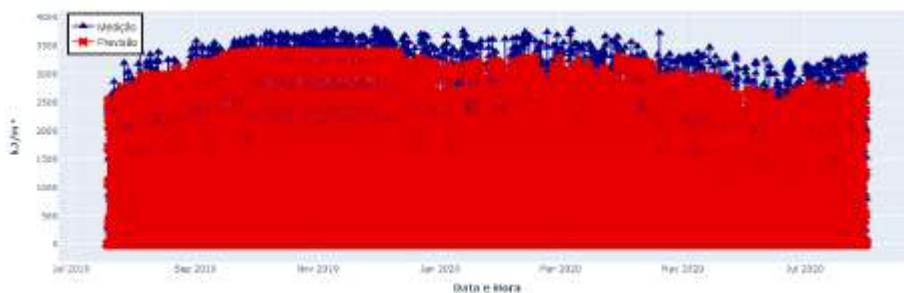


Figura 8. Radiação global (kJ/m^2) prevista versus real em um período de 1 ano (2019–2020).

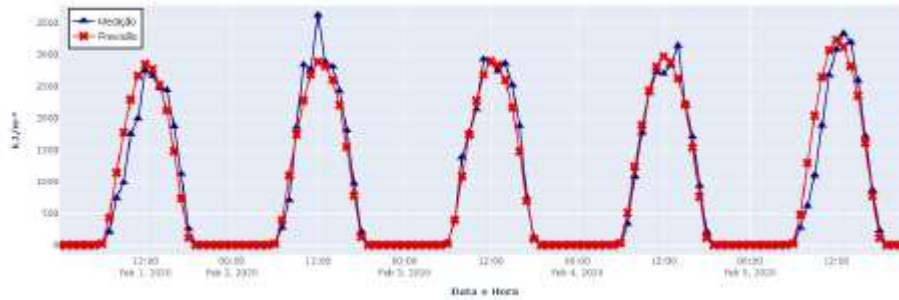


Figura 9. Radiação global (kJ/m^2) prevista versus real para 5 dias.

Na Figura 10, apresenta-se as médias horárias mensais para os meses onde ocorrem maiores e menores gerações, onde podem ser comparadas as previsões com os dados reais de produção da UFV que constam na ONS. Os resultados do modelo de previsão obtido estão coerentes e podem ser considerados satisfatórios.

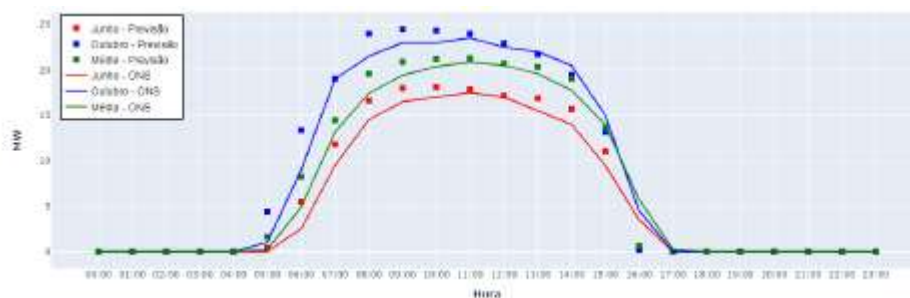


Figura 10. Energia elétrica gerada (MW) prevista versus real.

4. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento neste trabalho, foram apresentadas as etapas para a elaboração de um modelo de previsão para a geração de energia elétrica para um parque solar fotovoltaico localizado no município de Coremas - PB baseado em redes neurais artificiais do tipo LSTM. A partir de dados coletados das bases do INMET próximas à localização do parque de Coremas-PB, foram realizadas, antes do uso destes dados na RNA, a análise e o tratamento dos dados, consistindo em transformações para controle de dados faltantes, análise de outliers, interpolações (método IDW) e normalizações, dentre outros.

Após esses procedimentos, realizou-se a escolha do melhor modelo a ser utilizado. Para isso, definiu-se pela RNA do tipo LSTM com variações na arquitetura da rede. Os hiperparâmetros variados foram o otimizador e a taxa de dropout. O modelo selecionado para a previsão apresentou 3 camadas ocultas com 168 neurônios em cada camada, função de ativação tanh nas camadas ocultas e a sigmoid na

saída, otimizador ADAM e um dropout de 10%. Este modelo conseguiu as melhores métricas de erros de previsão de irradiância e geração de energia para 24 horas à frente.

Os resultados do modelo de previsão usando RNA do tipo LSTM apresentou resultados satisfatórios, demandando ainda ajustes para refinamento de desempenho. Contudo, verificou-se potencial elevado do uso de técnicas de inteligência artificial, como deep learning em sistemas industriais/residenciais reais. Estas previsões, podem trazer visão mais segura da geração de energia elétrica e possibilita maior planejamento para usuários, gestores e equipes de manutenção.

AGRADECIMENTOS

Á todos os professores e funcionários da UFPB que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (2020). Sistema de Informações de Geração da ANEEL <https://www.aneel.gov.br/signa>. Online; acesso em: 30 de Julho de 2020.
- Ali, A.B.M.S. (2013). *Smart Grids: Opportunities, Developments and Trends*. Springer Science & Business Media.
- Botchkarev, A. (2017). Performance metrics (error measures) in machine learning regression, forecasting and prognostics: Properties and typology. ArXiv preprint arXiv:1809.03006.
- Boussaada, Z., Curea, O., Remaci, A., Camblong, H., and Bellaaj, N.M. (2018). A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation. *Energies*, 11.
- Diniz, T.L. (2018). Relatório de Estágio Supervisionado realizado no Complexo Solar Coremas. Centro de Energias Alternativas e Renováveis - Departamento de Engenharia de Energias Renováveis.
- Eesa, A.S. and Arabo, W.K. (2017). Normalization methods for backpropagation: A comparative study. *Science Journal of University of Zakho*, 5(4), 314–318.
- Empresa de Pesquisa Energética (2020). Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese /mano Base 2019 <https://www.epe.gov.br/pt/publicações-dados-abertos/publicações/balanco-energetico-nacional-2020>. Online; acesso em: 29 de Julho de 2020.
- Faceli, K., Lorena, A.C., Gama, J., and de L. F. de Carvalho, A.C.P. (2011). *Inteligência Artificial: Uma Abordagem de Aprendizagem de Máquina*. LTC, Rio de Janeiro.
- Fadare, D.A. (2009). Modelling of solar energy potential in Nigeria using an artificial neural network model. *Applied Energy*, 86, 1410–1422.
- Fiorin, D.V., Martins, F.R., Schuch, N.J., and Pereira, E.B. (2011). Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(1).
- Gensler, A., Henze, J., Sick, B., and Raabe, N. (2016).
- Deep learning for solar power forecasting – an approach using autoencoder and lstm neural networks. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2858–2865.
- Gholipour, Y., Shahbazi, M.M., and Behnia, A. (2013). An improved version of inverse distance weighting metamodel assisted harmony search algorithm for truss design optimization. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10(2).
- Gómez, V. and Casanovas, A. (2003). Fuzzy modeling of solar irradiance on inclined surfaces. *Solar Energy*, 75, 307–315.
- Hutter, F., Lücke, J., and Schmitd-Thieme, L. (2015).
- Beyond manual tuning of hyperparameters. *Künstl Intell*, 29, 329–337.

Inman, R.H., Pedro, H.T., and Coimbra, C.F. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration.

Progress in Energy and Combustion Science, 39, 535– 576.

INMET (2020). <https://portal.inmet.gov.br/>. Online; acesso em: 07 de Agosto de 2020.

Junior, O.M., Comunello, E., and Fietz, C.R. (2020).

Qualidade da radiação solar global de diferentes bases digitais para mato grosso do sul. Revista da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 28(2), 173–182.

Loy, J. (2019). Neural Network Projects with Python: The ultimate guide to using Python to explore the true power of neural network through six projects. Packt.

Mellit, A. and Pavan, A.M. (2010). A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected pv plant at Trieste, Italy. Solar Energy, 84, 807–821.

Müller, A.C. and Guido, S. (2016). Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists. O'Reilly.

Neelamegam, P. and Amirtham, V.A. (2016). Prediction of solar radiation for solar systems by using ANN models with different back propagation algorithms. Journal of Applied Research and Technology, 14(3), 206–214.

ONS (2020). Boletins de Operação, <http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-solar.aspx>. Online; acesso em: 05 de Julho de 2020.

Ordóñez, F., Morales, C., López- Villada, J., and Vaca, S. (2018). Assessment of the energy gain of photovoltaic systems by using solar tracking in equatorial regions. Journal of Solar Energy Engineering, 140.

Pang, Z., Niu, F., and O'Neill, Z. (2020). Solar radiation prediction using recurrent neural network and artificial neural network: A case study with comparisons. Renewable Energy, 156, 279–289.

Person, C., Bacher, P., Shiga, T., and Madsen, H. (2017). Multi-site solar power forecasting using gradient boosted regression trees. Solar Energy, 150, 423–436.

Reda, I. and Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. Solar Energy, 76, 577– 589.

Sola, J. and Sevilla, J. (1997). Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems. IEEE Transactions on Nuclear Science, 44(3), 1464–1468.

Solmaz, O. and Ozgoren, M. (2012). Prediction of hourly solar radiation in six provinces in Turkey by artificial neural networks. Journal of Energy Engineering, 138, 194–204.

Sözen, A., Arcaklioğlu, E., Özalp, M., and Kanit, E.G. (2004). Use of artificial neural networks for mapping of solar potential in Turkey. Applied Energy, 77, 273–286.