

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO SARAIVA

APLICAÇÃO DE INDICADORES EM TEMPO REAL E SIMULAÇÃO DE
PROCESSOS NO GERENCIAMENTO DOS CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E
ENERGIA PARA MÁQUINAS DE PAPEL DE GRANDE PORTE

CURITIBA

2023

MARCELO SARAIVA

APLICAÇÃO DE INDICADORES EM TEMPO REAL E SIMULAÇÃO DE
PROCESSOS NO GERENCIAMENTO DOS CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E
ENERGIA PARA MÁQUINAS DE PAPEL DE GRANDE PORTE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Deivid Valle
Coorientador: Prof. Dr. Christian S. Strobel

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Saraiva, Marcelo

Aplicação de indicadores em tempo real e simulação de processos no gerenciamento dos consumos de água, vapor e energia para máquinas de papel de grande porte / Marcelo Saraiva. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Pablo Deivid Valle

Coorientador: Christian S. Strobel

1. Água – Desperdício. 2. Máquinas para confecção de papel. 3. Framework (Arquivo de computador). I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. III. Valle, Pablo Deivid. IV. Strobel, Christian S. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCELO SARAIVA** intitulada: **APLICAÇÃO DE INDICADORES EM TEMPO REAL E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS NO GERENCIAMENTO DOS CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E ENERGIA PARA MÁQUINAS DE PAPEL DE GRANDE PORTE**, sob orientação do Prof. Dr. PABLO DEIVID VALLE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 11 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica
18/04/2023 17:27:29.0
PABLO DEIVID VALLE
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
16/05/2023 12:00:48.0
RAFAEL ARAUJO KLUSKA
Avaliador Externo (FLUXO SOFTWARES E CONSULTORIA)

Assinatura Eletrônica
18/04/2023 18:55:18.0
FERNANDO DESCHAMPS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
24/05/2023 14:30:12.0
CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

DEDICATÓRIA

Para minha esposa Claudia, aos meus colegas de trabalho, e aos meus professores orientadores.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Pablo Deivid Valle e coorientador Prof. Dr. Christian S. Strobel, por todo o tempo e dedicação dispendido por eles para a realização desse trabalho.

Aos meus colegas de trabalho da Klabin da Unidade Correia Pinto/SC e do time corporativo da Gerência de Tecnologia de Automação.

A minha esposa que me apoiou em todos os momentos da elaboração desse trabalho.

O primeiro passo é estabelecer que algo é possível, e então a probabilidade ocorrerá. (ELON MUSK, 2018)

RESUMO

Com a população mundial em crescimento e um consumo de água cada vez maior, toda e qualquer iniciativa que promova o uso consciente desse precioso recurso natural é bem-vinda, inclusive para os seus derivados diretos, como a produção de vapor e energia em indústrias de papel e celulose, que são responsáveis por uma parcela razoável do consumo de energia e emissões de carbono no mundo. Neste cenário, tendo como foco de estudo as máquinas de papel, tanto pela sua relevância no mercado como pela sua vocação histórica de serem grandes consumidoras de água, vapor e energia, estudos relativos à mitigação do uso consciente desses insumos são necessários, e devido à alta complexidade desse processo, muitas vezes o time de operação tem como foco principal manter a disponibilidade dos equipamentos, garantir a produtividade e qualidade do produto final. A partir da metodologia Design Science Research (DSR), utilizando como ferramentas de pesquisa a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) e Revisão Bibliográfica Assistemática (RBA), este trabalho tem por objetivo demonstrar os resultados alcançados em uma PoC (prova de conceito) realizada em uma fábrica de papel localizada no sul do Brasil, pelo desenvolvimento de artefatos destinados para a coleta de informações, visualização de indicadores, pela geração de visualizações gráficas de custos financeiros, pela simulação de cenários de consumos de água, vapor e energia, e a criação de um framework para a replicação desse trabalho, utilizando conceitos da Indústria 4.0, as tecnologias Digital Twin e modelos digitais, propiciando aos times de operação e gestão da máquina uma melhor gestão da utilização desses insumos, e adicionalmente, sugerindo estudos futuros em outros tipos de máquinas de papel e em outros tipos de processo.

Palavras-chave: Máquina de Papel. Desperdício. Simulação de Processo. Indústria 4.0. Digital Twin, Modelo Digital. Água. Vapor. Energia.

ABSTRACT

With a growing world population and ever-increasing water consumption, any initiative that promotes the conscious use of this precious natural resource is welcome, including its direct derivatives, such as the production of steam and energy in pulp and paper, which are responsible for a fair share of energy consumption and carbon emissions in the world. In this scenario, with paper machines as the focus of study, both for their relevance in the market and for their historical vocation of being large consumers of water, steam, and energy, studies related to the mitigation of the correct use of these inputs are necessary, and due to the high complexity of this process, the operation team is often focused on maintaining the availability of equipment, ensuring productivity and quality of the final product. Based on the Design Science Research (DSR) methodology, using the Systematic Literature Review (SLR) and Unsystematic Literature Review (ULR) as research tools, this work aims to demonstrate the results achieved in a PoC (proof of concept) carried out in a paper factory located in the south of Brazil, for the development of artifacts destined to collect information, visualization of indicators, for the generation of graphic visualizations of financial costs, for the simulation of scenarios of consumption of water, steam and energy, and the creation of a framework for the replication of this work, using Industry 4.0 concepts, Digital Twin technologies, and digital models, providing machine operation and management teams with better management of the use of these inputs, and additionally, suggesting future studies in other types of paper machines and processes.

Keywords: Paper machine. Waste. Process simulation. Industry 4.0. Digital Twin. Digital Model. Water. Steam. Energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRIMEIRA MÁQUINA DE PAPEL DE COMPRIMENTO INFINITO.....	19
FIGURA 2 – PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO.....	20
FIGURA 3 – EXEMPLO DE UMA MODERNA MÁQUINA DE PAPEL.....	20
FIGURA 4 – LÓGICA DA CONSTRUÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	29
FIGURA 5 – ETAPAS DA ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	30
FIGURA 6 – CICLO DE ETAPAS DA PESQUISA EM DESIGN SCIENCE.....	31
FIGURA 7 – DSR PARA ESTUDO DE CASO.....	33
FIGURA 8 – DSR PARA ESTE PROJETO.....	35
FIGURA 9 – UNIDADE KLABIN CORREIA PINTO/SC.....	36
FIGURA 10 – PARTES DA MP-16 NA UNIDADE KLABIN CORREIA PINTO/SC.....	36
FIGURA 11 – EXEMPLOS DE PESQUISAS RBA DESTE TRABALHO.....	41
FIGURA 12 – FRAMEWORK PRELIMINAR DO ESTUDO.....	42
FIGURA 13 – FRAMEWORK DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	44
FIGURA 14 – PASSOS QUE COMPÕEM O PROCESSO KDD (FRAMEWORK).....	46
FIGURA 15 –VISUALIZAÇÃO DE DADOS EM DASHBOARDS (FRAMEWORK).....	48
FIGURA 16 –TABELAS, LISTA DE DADOS E TEXTOS EM DASHBOARDS (FRAMEWORK).....	49
FIGURA 17 – TELA DE BOAS-VINDAS DO POWER BI DESKTOP.....	50
FIGURA 18 – FUNCIONALIDADES MAIS COMUNS DO POWER BI®.....	51
FIGURA 19 – VISÃO SIMPLIFICADA DO PI SYSTEM®.....	52
FIGURA 20 – EXEMPLOS DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS NO PI VISION®.....	52
FIGURA 21 – ORGANIZAÇÃO DOS ELEMENTOS E ATRIBUTOS NO PI AF®.....	53
FIGURA 22 – ORGANIZAÇÃO DAS ANÁLISES NO PI ANALYTICS®.....	54
FIGURA 23 – MODELO DIGITAL UTILIZANDO O PI-AF® DA AVEVA®.....	55
FIGURA 24 – EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PI DATALINK®.....	56
FIGURA 25 – EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PI BUILDER®.....	56
FIGURA 26 –CONFIGURAÇÃO EM PYTHON® COM O VS CODE.....	58
FIGURA 27 – MUNDO REAL VERSUS MODELO.....	59
FIGURA 28 – FRAMEWORK DE MODELO DE DIGITAL TWIN.....	60
FIGURA 29 – EXEMPLOS DO USO DO DIGITAL TWIN NA MANUFATURA.....	61
FIGURA 30 – FLUXO DE DADOS NO DIGITAL MODEL (DM).....	62
FIGURA 31 – FLUXO DE DADOS NO DIGITAL SHADOW (DS).....	63

FIGURA 32 – FLUXO DE DADOS NO DIGITAL TWIN (DT).....	63
FIGURA 33 –DIGITAL TWIN EM SISTEMAS CYBER FÍSICOS (FRAMEWORK)....	65
FIGURA 34 –COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS (FRAMEWORK).....	67
FIGURA 35 – DIFERENÇA ENTRE DIGITAL TWIN E DIGITAL MODEL.....	69
FIGURA 36 – ARQUITETURA GENÉRICA CONCEBIDA	71
FIGURA 37 – ARQUITETURA CONCEBIDA DO SISTEMA.....	72
FIGURA 38 – KPI ÁGUA x CE ÁGUA (EXEMPLO).	74
FIGURA 39 – VALOR PREDITO DA ÁGUA (EXEMPLO).	75
FIGURA 40 –MODELO VIRTUAL DOS CONSUMOS NO PI SYSTEM®.	76
FIGURA 41 – MEDIÇÃO CE ÁGUA E SEU RESPECTIVO INDICADOR	77
FIGURA 42 – CÁLCULO INSUMOS PARA PRODUTO (EXEMPLO).....	78
FIGURA 43 – TELA GERAL INDICADORES MP-16 EM PI VISION®.....	79
FIGURA 44 – TELA KPI DA ÁGUA DA MP-16 EM PI VISION®	79
FIGURA 45 –TENDÊNCIA, INDICADORES CE e KPI ÁGUA NA MP-16	80
FIGURA 46 – GAUGES KPIS ATUAL NO POWER BI®.....	81
FIGURA 47 – GRÁFICO DE KPIS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®.....	82
FIGURA 48 – KPIS MÉDIOS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®.....	82
FIGURA 49 –CONSUMOS MÉDIOS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®.....	82
FIGURA 50 –CONSUMOS MÉDIOS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®.....	83
FIGURA 51 –DIFERENÇA DE CUSTOS IDEAL POR ROLO NO POWER BI®	83
FIGURA 52 –CUSTO DA ÁGUA E BALANÇO POR DIA NO POWER BI®	84
FIGURA 53 – CONSUMO DO INSUMO NO POWER BI®.....	84
FIGURA 54 – KPIS, PRODUÇÃO E CONSUMOS NO POWER BI®	85
FIGURA 55 – CÁLCULO INSUMOS PARA PRODUTO (EXEMPLO).....	85
FIGURA 56 – FLUXO DAS INFORMAÇÕES (PREDIÇÃO DE INSUMOS)	86
FIGURA 57 – FRAMEWORK FINAL PROPOSTO	89
FIGURA 58 – ESCALA DE VISUALIZAÇÃO DOS KPIS PARA 1 HORA	90
FIGURA 59 – ESCALA DE VISUALIZAÇÃO DOS KPIS PARA 8 HORAS	90
FIGURA 60 –VISUALIZAÇÃO DO KPI QUANDO FOLHA EM QUEBRA.....	91
FIGURA 61 –VISUALIZAÇÃO DO KPI QUANDO EM ALTO CONSUMO.....	91
FIGURA 62 – CICLO DE MELHORIA CONTÍNUA DOS KPIS	92
FIGURA 63 –VISUALIZAÇÃO DOS CUSTOS QUANDO EM ALTO CONSUMO	93
FIGURA 64 –EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE P/ KPIS	107
FIGURA 65 –EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE.....	109

FIGURA 66 – VALORES “a” e “b” PARA A ÁGUA	112
FIGURA 67 – LÓGICA SELEÇÃO FUNÇÃO KPI x CE POR PRODUTO	113
FIGURA 68 – KPI CONSUMO DA ÁGUA DO ROLO ATUAL	114
FIGURA 69 – FLUXOGRAMA DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE P/ PESOS CALCULADOS	116
FIGURA 70 – FLUXOGRAMA DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE P/ MODELO DE PREDIÇÃO.....	117
FIGURA 71 – FRAGMENTO DE UMA REDUÇÃO DE DADOS.....	120
FIGURA 72 – FUNÇÕES NO PI ANALYSIS (EXEMPLO)	121
FIGURA 73 –TELA ENERGIA TOTAL NO POWER BI®	123

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PUBLICAÇÕES COM O TEMA DIGITAL TWIN (2009 -2018)	60
GRÁFICO 2 – RESUMO DOS ÍNDICES R ² OBTIDOS EM %.....	95
GRÁFICO 3 – NÚMERO DE ACERTOS x FAIXAS DE ERRO EM %.....	96

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – LISTA DE FERRAMENTAS DO POWER BI®.....	50
QUADRO 2 – EXEMPLOS DE BIBLIOTECAS PADRÕES DO PYTHON®.....	57
QUADRO 3 – METODOLOGIA DE REDUÇÃO DOS DADOS HISTÓRICOS POR PRODUTO	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PORCENTAGEM DE ÁGUA ELIMINADA NO PROCESSO.....	21
TABELA 2 – CONSUMOS ESTIMADOS DE VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA POR TIPO DE PAPEL	22
TABELA 3 – CONSUMOS ESPECÍFICOS ESTIMADOS POR TIPO DE PAPEL	23
TABELA 4 – PERGUNTAS, STRINGS/ARGUMENTOS E RESULTADOS (RBS1)..	39
TABELA 5 – PERGUNTAS, STRINGS/ARGUMENTOS E RESULTADOS (RBS2)..	40
TABELA 6 – VARIAÇÃO DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS NA MP-16.....	77
TABELA 7 – MEDIÇÃO DE EFETIVIDADE DA FERRAMENTA DE VISUALIZAÇÃO DE KPIs	94
TABELA 8 – FAIXAS DE ERRO x QUANTIDADE DE ACERTOS DO MODELO	97
TABELA 9 – MEDIÇÃO DE EFETIVIDADE DA FERRAMENTA DE PREDIÇÕES DE CONSUMOS	97

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AF	- Asset Frame
API	- Application Programming Interface
APP	- Application
BI	- Business Intelligence
CE	- Consumo Específico
CEA	- Consumo Específico da Água
CEE	- Consumo Específico de Energia
CEVB	- Consumo Específico de Vapor de Baixa
CEVM	- Consumo Específico de Vapor de Média
CP	- Correia Pinto
CPS	- Cyber Physical System
CTD	- Comitê de Transformação Digital
DCS	- Digital Control System
DES	- Discrete Event Simulation
DM	- Digital Model
DS	- Digital Shadow
DSR	- Design Science Research
DT	- Digital Twin
ERP	- Enterprise Resource Planning
ETA	- Estação de Tratamento de Água
FAO	- Food and Agriculture Organization
GTA	- Gerência de Tecnologia de Automação
GJ/t	- Giga Joule / tonelada
g/m ²	- grama / metro quadrado
ICT	- Information and Communication Technology
ID	- Identification
IoT	- Internet of Things
IIoT	- Industrial Internet of Things
ISO	- International Organization for Standardization
KDD	- Knowledge Discovery in Databases
KPI	- Key Performance Indicator
KW	- Kilowatt

KWh/t	- Kilowatt hora / tonelada
MES	- Manufacturing Enterprise System
MP-16	- Máquina de Papel 16
ML	- Machine Learning
MW	- Megawatt
MWh	- Megawatt hora
m ³	- Metro cúbico
m ³ /t	- Metro cúbico / tonelada
m/min	- Metro / minuto
NET	- Network
ORT	- Ortigueira
PI	- Plant Information
PID	- Proporcional, Integral e Derivativo
PLC	- Process Logic Control
PLM	- Product Lifecycle Management
PIMS	- Plant Information Management System
PoC	- Proof of Concept
PR	- Paraná
RAC	- Refinador de Alta Consistência
RBS	- Revisão Bibliográfica Sistemática
RBA	- Revisão Bibliográfica Assistemática
RBC	- Refinador de Baixa Consistência
SAP	- Systemanalysis Programmentwicklung
SC	- Santa Catarina
SE	- Subestação Elétrica
SP	- São Paulo
QCS	- Quality Control System
TA	- Tecnologia de Automação
TI	- Tecnologia de Informação
t/h ou ton/h	- tonelada / hora
t ou ton	- tonelada
VB	- Vapor de Baixa Pressão
VM	- Vapor de Média Pressão
VS	- Visual Studio

LISTA DE SÍMBOLOS

@ - arroba

® - marca registrada

Σ - somatório de números

°C - Grau Celsius

% - Porcentual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL.....	18
1.1.1 Um breve histórico das origens do processo contínuo	18
1.1.2 Descritivo resumido do processo da máquina de papel	19
1.1.3 Descritivo resumido de uma moderna máquina de papel.....	20
1.1.4 A extração de água da polpa durante do processo de fabricação de papel	21
1.1.5 Os consumos de água, vapor e energia no Processo	22
1.1.6 Perdas típicas no processo	23
1.1.7 O uso de tecnologias da Indústria 4.0 para melhora de processos industriais em Papel e Celulose	25
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	26
1.3 OBJETIVOS	26
1.3.1 Objetivo geral	26
1.3.2 Objetivos específicos.....	27
1.4 METODOLOGIA.....	28
2 ABORDAGEM METODOLÓGICA	30
2.1 DESCRITIVO DO DESIGN SCIENCE RESEARCH (DSR).....	30
2.2 DSR PARA O ESTUDO DE CASO DESSE PROJETO	32
2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO.....	36
2.4 ENTENDIMENTO DO PROJETO	37
2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS) E ASSISTEMÁTICA (RBA) DO PROJETO	38
2.5.1 O Digital Twin em processos industriais e consumos de água e energia em Máquinas de Papel (RBS 1).....	38
2.5.2 Visualização gráfica de KPIs aplicados em Papel e Celulose (RBS 2)	39
2.5.3 Revisão Bibliográfica Assistemática (RBA) do Projeto.....	40
2.6 PROPOSIÇÃO DE UM FRAMEWORK	41
3 REVISÃO DA LITERATURA	43
3.1 VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE INDICADORES.....	47
3.1.1 Framework e tendências na construção de dashboards	48
3.1.2 O uso do Power BI® para a criação de dashboards	49
3.1.3 O uso do PI Vision® para a criação de dashboards.....	51

3.1.4 O uso do Python® para a criação da interface de Simulação de Cenários	57
3.2 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS.....	58
3.2.1 Aplicação da Tecnologia Digital Twin em Sistemas Cyber Físicos	64
3.2.2 Aplicação da Tecnologia Digital Twin para o auxílio na otimização de processos e planejamento da produção.....	66
3.2.3 A Simulação de Processos com o uso da tecnologia Digital Twin	67
4 DESENVOLVIMENTO	70
4.1 A ESTRUTURAÇÃO DO PRODUTO TECNOLÓGICO.....	71
4.1.1 A Arquitetura genérica do Sistema	71
4.1.2 A Arquitetura concebida do Sistema	72
4.1.3 Ferramentas matemáticas para geração dos KPIs e previsões	74
4.1.4 Definição e estruturação das variáveis de interesse	75
4.1.5 Representação virtual dos consumos de água, vapor e energia na MP-16	76
4.2 KPIS DE CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E ENERGIA	76
4.3 PREDIÇÃO DE CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E ENERGIA.....	78
4.4 DASHBOARDS NO PI VISION® PARA O GRUPO DE OPERAÇÃO	78
4.5 DASHBOARDS NO POWER BI ® PARA O GRUPO DE GESTÃO	81
4.6 INTERFACE GRÁFICA VIA PYTHON ® DA PREDIÇÃO DE CONSUMOS	85
4.7 DETALHAMENTO DO FRAMEWORK PROPOSTO.....	87
4.7.1 Framework de captura de dados dos processos.....	87
4.7.2 Framework para o uso dos Modelos Digitais em Sistemas Cyber Físicos	88
4.7.3 Framework de visualização de simulações e KPIs.....	88
4.7.4 Representação gráfica do Framework.....	89
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	90
5.1 KPIS A PARTIR DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS NO PI VISION®	90
5.2 VISUALIZAÇÃO DE CUSTOS POR PRODUTO NO POWER BI®.....	93
5.3 SISTEMA DE PREDIÇÃO DE CONSUMOS DE INSUMOS POR PRODUTO NO PYTHON®.....	94
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS.....	101
APÊNDICE 1 – GERAÇÃO DE KPIS ATRAVÉS DOS CES, COM AUXÍLIO DO MINITAB®.....	106

APÊNDICE 2 – GERAÇÃO DOS INSUMOS CALCULADOS COM O AUXÍLIO DO MINITAB®.....	115
APÊNDICE 3 – FRAGMENTO DO TRABALHO DE ANÁLISE TAGUCHI PARA AS VARIÁVEIS DE INTERESSE DESSE PROJETO.....	122
APÊNDICE 4 – TELA ENERGIA TOTAL NO POWER BI®	123

1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de desenvolver uma ferramenta tecnológica que permita uma melhoria na eficiência do uso de água, vapor e energia em máquinas de papel utilizando conceitos da Indústria 4.0, será feita uma breve contextualização da importância do problema, da relevância do setor de papel e celulose na economia mundial, e um descritivo de possibilidades de melhorias do uso desses insumos.

O consumo desenfreado dos recursos naturais pelo homem, em especial a água, é uma grande preocupação para todos, pois é um recurso natural base para a subsistência das pessoas, e também é base para a indústria, incluindo setores da manufatura, têxtil, química, petroquímica e o setor de papel e celulose.

Com uma população mundial em crescimento, em números que podem chegar a 13,3 bilhões de habitantes até 2030, uma taxa de consumo de água que cresceu 1,7 vezes mais que a taxa do crescimento populacional (FAO, 2017), e as reservas de água de fontes renováveis diminuirão 62% em pouco mais de 50 anos, somente no Brasil, de 1962 até 2017 (OURWORLDINDATA, 2021), é gerado o alerta para a utilização consciente desse importante recurso natural.

Pelo ponto de vista da circularidade do uso da água, é razoável o entendimento que a utilização na indústria requer grande atenção, pois quanto maior a possibilidade do reaproveitamento no processo, menor é a quantidade de água fresca extraída da natureza para a manutenção da produção.

Em um processo industrial, é comum a utilização da água para a realização de diversos tipos de trabalhos, que vão desde a lavagem de outros tipos de insumos, até a produção de vapor, importante elemento que pode ser usado para a geração de calor, e também para a produção de energia elétrica, com a utilização de turbogeradores, por exemplo. Neste sentido, o uso consciente da água, traz consequências diretas em outros tipos de reduções de consumos no setor industrial, como a energia elétrica e vapor.

Segundo a Fao (2017), os maiores consumidores de água são respectivamente a agricultura (70%), as indústrias (20%) e as famílias (10%), mostrando como a evolução da humanidade canalizou o uso desse importante recurso natural da subsistência, para a agricultura e indústrias. Pelo ponto de vista da circularidade do uso da água na natureza, é razoável o entendimento que a utilização na indústria requer grande atenção, pois quanto maior a possibilidade do

reaproveitamento no processo, menor é a quantidade de água fresca extraída da natureza para a manutenção da produção.

No contexto da indústria, os maiores consumidores por segmento são: papel e celulose, têxtil, química, petroquímica e manufatura (FAO, 2017), e fazendo uma análise por segmento, a indústria de papel e celulose é uma importante personagem neste cenário, devido à sua relevância econômica e estratégica.

A atividade de produção de papel e celulose é uma das maiores no mundo, com alto grau de capital investido. Somente em 2014, o total da produção mundial de papel beirou os 406 milhões de toneladas, sendo que somente a Ásia respondeu por aproximadamente 45% desse total (179 milhões de toneladas). CORCELLI, F.; RIPA, M.; ULGIATI, S (2018).

Segundo Saraiva M. et al. (2021), analisando o cenário nacional, existem pelo menos 250 fábricas de papel no Brasil, que disponibilizaram ao mercado 10,4 milhões de toneladas somente no ano de 2019, ocupando a oitava posição dos produtores no mundo, que por sua vez teve a liderança da China, com produção de 115,5 milhões de toneladas. Ainda em 2019, os dez maiores produtores mundiais produziram pouco mais de 300 milhões de toneladas. É estimado um crescimento de 1,1% ao ano desse mercado, que deve atingir o equivalente a 482 milhões de toneladas produzidas em 2030.

Por outro lado, pelo ponto de vista da análise do consumo de energia desse setor, com dados de 2016, segundo Corcelli, F. et al. (2018), o setor de papel e celulose ocupou a quarta posição no ranking dos maiores consumidores de energia por tipo de indústria, com 6% de toda a energia consumida e foi responsável por pelo menos 2% da emissão de dióxido de carbono no mundo. Como referência, na Finlândia (segundo produtor europeu de papel – 10,1 milhões de toneladas de papel e papelão), pelo menos 50% da energia consumida foi devido às empresas do ramo de papel e celulose.

Dessa forma, as empresas do ramo de papel e celulose buscam continuamente soluções que promovam a diminuição de consumos de insumos de uma forma geral, com o intuito de que baixar os seus custos de produção, promovendo a eficiência de uma forma geral, sempre destacando que o controle dos parâmetros on line desse tipo de processo possui dificuldades pelo ponto de vista da quantidade de controles e da complexidade de partes deles.

Segundo Arumugan, A. (2017), diversas atividades e tecnologias relacionadas ao uso da matéria prima, energia, água, tratamento de água, emissão de partículas sólidas no ar, bem como práticas adotadas na operação da floresta (silvicultura, preparo de solo, colheita), são práticas adotadas por algumas empresas, que vão desde a reciclagem de resíduos, produzindo concreto pela cinza do carvão e escória do forno, pela empresa APP na China, a utilização de águas recuperadas de sistemas de resfriamento ao invés de água limpa para sistemas de selagem de bombas, pela empresa Clear Water, nos Estados Unidos, até a instalação de um sistema de energia solar com tecnologia de rastreamento produzindo 1 MW de eletricidade, pela empresa International Paper, também nos Estados Unidos.

Neste contexto, este trabalho irá descrever em detalhes a importância e relevância do uso consciente da água e seus derivados diretos conforme ilustrado anteriormente, mostrando especificamente o setor de papel e celulose, trazendo resultados obtidos pela implantação de ferramentas digitais de gestão utilizando conceitos da Indústria 4.0 com a aplicação de técnicas de Digital Twin, mais especificamente em simulação de processos, para a construção de indicadores (KPIs), em ferramentas de visualização dinâmica de custos versus indicadores, e na previsão de consumos baseados na programação de produção em uma fábrica de papel na região sul do Brasil, e posterior construção de um framework das soluções encontradas.

1.1 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL

A evolução da fabricação de papel para processo “contínuo” evoluiu substancialmente nos últimos 300 anos, conforme breve histórico a seguir. Em seguida, serão evidenciados os modernos processos, com uma descrição resumida dos principais tipos de papel fabricados no mercado.

1.1.1 Um breve histórico das origens do processo contínuo

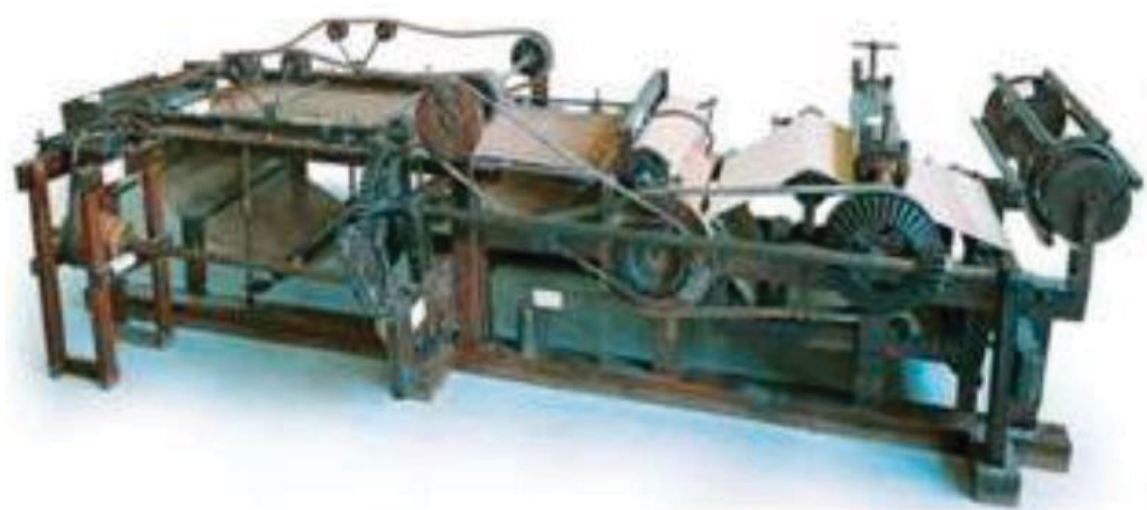
Em 1799, Luis Robert inventou a primeira máquina de papel na França. A primeira máquina de papel de comprimento infinito surgiu em 1804 na França, desenvolvida pelos irmãos Fourdrinier, e em 1808 esta máquina foi aperfeiçoada por

Robert, Didot e Dorkin. Até os dias atuais esse princípio é conhecido como “Máquina Fourdrinier”, pelo fato dele ter financiado o Projeto.

Estes modelos de máquinas desenvolvidas a partir da primeira metade do século XIX foram aperfeiçoados continuamente, até que na segunda metade do século XX, foram introduzidas no processo as pastas feitas de madeira e outros tipos de plantas, tirando assim a necessidade da utilização de restos de fibras de tecido (trapos), que até aquele momento eram vitais ao processo.

A FIGURA 1 abaixo mostra alguns detalhes da primeira máquina de papel com comprimento infinito:

FIGURA 1 – PRIMEIRA MÁQUINA DE PAPEL DE COMPRIMENTO INFINITO.



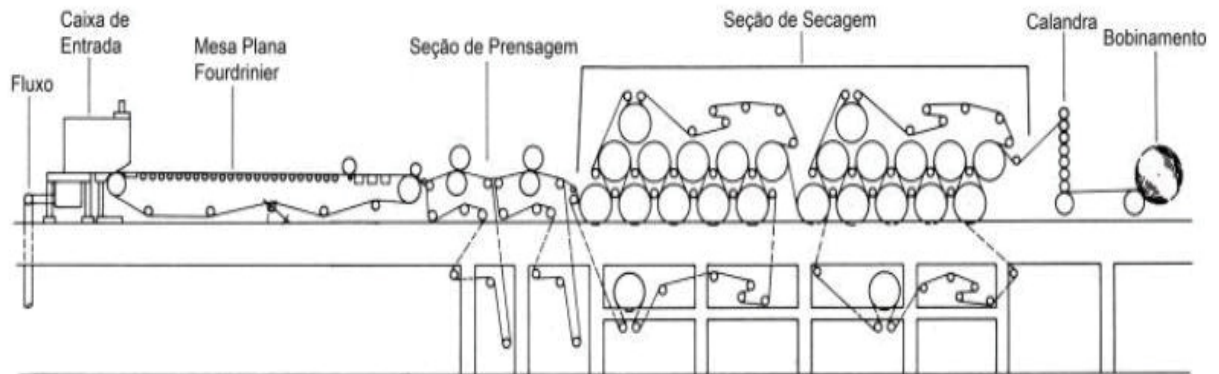
FONTE: Campos, E. da S. (2011).

Nos dias atuais, a máquina Fourdrinier tem as mesmas etapas do primeiro modelo criado, com mais avanços tecnológicos, mas com algumas mudanças extremas em algumas partes da máquina. CAMPOS, E. da S. (2011).

1.1.2 Descritivo resumido do processo da máquina de papel

Segundo Sousa, J. C. L. et al. (2011), a principal função de uma máquina de papel é remover a água da folha que se forma, e é feita e quatro etapas, conforme FIGURA 2 abaixo:

FIGURA 2 – PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO.



FONTE: Sousa, J. C. L. et al. (2011).

- a) A Formação do Papel: na Caixa de Entrada e Mesa Plana, utilizando as características da dinâmica da formação da polpa, na superfície;
- b) Prensa: tira a umidade da folha pré-formada por compressão mecânica;
- c) Secagem: tira a água por processo de evaporação, pelo fornecimento de calor por injeção de vapor nos cilindros secadores;
- d) Calandra e Bobinamento: responsável por gerar o papel em formato de rolos

1.1.3 Descritivo resumido de uma moderna máquina de papel

Em uma visão integrada dos processos, segundo a Valmet (2021), as partes de uma moderna máquina de papel podem ser evidenciadas, em parte úmida, parte seca e bobinadeira, conforme FIGURA 3 abaixo:

FIGURA 3 – EXEMPLO DE UMA MODERNA MÁQUINA DE PAPEL.



FONTE: Valmet (2021).

O diagrama típico da FIGURA 3 acima pode variar conforme o tipo de papel que está sendo fabricado, com a adição de mais ou menos etapas no processo.

Os modernos processos de fabricação de papel buscam como chave de capacidade de produção sustentável a chave para assegurar o retorno mais alto possível no investimento realizado na máquina de papel. A produção pode ser focada nos produtos onde demanda e preços são os mais rentáveis. VALMET (2021).

Ainda segundo Valmet (2021), as dimensões típicas de uma moderna máquina de papel podem atingir uma largura de até 7 metros, com um comprimento de até 140 metros, produzindo em torno de 1.000 toneladas por dia, a uma velocidade média do papel de até 1.200 metros / minuto.

1.1.4 A extração de água da polpa durante do processo de fabricação de papel

Conforme descrito anteriormente, a principal função de uma máquina de papel é tirar a água da polpa da celulose. Nesse cenário, segundo Campos, E. da S. (2011), pelo ponto de vista dos esforços e quantidade de água retirada da polpa, pode-se dividir por tipos e por custos, conforme TABELA 1 abaixo:

TABELA 1 – PORCENTAGEM DE ÁGUA ELIMINADA NO PROCESSO

ZONAS	Conteúdo de seco na entrada	Conteúdo de seco na saída	Porcentagem de água eliminada
Cx. de Entrada / Mesa Plana	1%	18%	95,4%
Seção de Prensagem	18%	42%	3,2%
Seção de Secagem	42%	94%	1,4%

FONTE: Campos, E. da S. (2011).

Percebe-se de forma clara que a maior porcentagem de água extraída do processo está na entrada da máquina (Mesa Plana e Caixa de Entrada), e a menor parte está na Secagem, o que não representa uma relação direta com os custos.

Por outro lado, na Caixa de Entrada / Mesa Plana, a utilização de bombas elétricas para formação de vácuo e conseqüente retirada da água do processo é utilizada, porém, apesar do custo menor em relação ao vapor, tem espaço para a utilização consciente na fabricação do papel, assim como o vapor utilizado na Secagem.

1.1.5 Os consumos de água, vapor e energia no Processo

O processo de uma máquina de papel típica, conforme anteriormente descrito, tem o principal objetivo de retirar água da folha de celulose que se forma da caixa de entrada e mesa plana, em diferentes estágios, com diferentes propósitos, transformando assim o produto da celulose em formato de pasta em papel, ao final da Secagem, pronta para ser enroladas nos Rolos Jumbo (Jumbo Rolls), e posteriormente transformadas em rolos menores (Baby Rolls), já no estágio de comercialização para os clientes finais.

Este processo consome quantidades de energia térmica (vapor) e elétrica para a retirada de água do processo, que por sua vez é reaproveitada. Ao mesmo tempo, existe a quantidade de água que o sistema não consegue reaproveitar, daí a necessidade de reposição de água fresca ao sistema de água.

Segundo Barbeli, M. C. (2005), o processo de fabricação de papel consome grande quantidade de energia elétrica e vapor, e dependendo do tipo de papel, podem variar consideravelmente. A TABELA 2 abaixo mostra dados típicos desses consumos:

TABELA 2 – CONSUMOS ESTIMADOS DE VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA POR TIPO DE PAPEL

Tipo de Papel	Consumo de vapor (GJ/t)	Consumo de Energia Elétrica	
		(GJ/t)	(KWh/t)
Papel Imprensa	3,4 – 5,5	1,51 – 2,28	420 – 630
Papel de impressão revestido	5,1 – 5,6	1,98 – 2,95	550 – 820
Papel de impressão s/ revestimento	4,3 – 7,2	1,98 – 2,41	550 – 670
Papéis especiais	3,7 – 7,7	1,58 – 3,24	440 - 900
Papel de embalagem	3,4 – 8,8	1,85 – 2,38	515 – 600
Papel para fins sanitários	2,6 – 4,5	3,01 – 3,78	835 - 1050

FONTE: Barbeli, M. C. (2005)

Segundo Dolny, L. M. (2011), o consumo médio de água em uma planta integrada de celulose e papel depende do Projeto, dos fatores operacionais, do processo de polpação, e do tipo de gramatura do produto, que estão diretamente associados aos tipos de produto.

A TABELA 3 abaixo mostra um levantamento feito em 28 fábricas de papel brasileiras, considerando diferentes tipos de papel, com os correspondentes consumos específicos de água (CEA):

TABELA 3 – CONSUMOS ESPECÍFICOS ESTIMADOS POR TIPO DE PAPEL

Tipo de Papel (número de fábricas)	CEA (m ³ /t)
Tissue	15,7 – 23,5
Escrever	6,7 – 22,8
Imprimir	12,4 – 61,1
Cartão	18,8 – 42,3
Embalagem	3,4 – 91,3
Outros	26,1 - 90

FONTE: Dolny, L. M. (2011).

Observar que o consumo específico de água representa o volume de água em metros cúbicos (m³), dividido pelo montante produzido pela máquina, em toneladas. A quantidade de água consumida, conforme já ilustrado, é fruto da diferença da água extraída do processo e a água necessária abastecida.

1.1.6 Perdas típicas no processo

Segundo Dolny, L. M. (2011), os principais pontos e causas de perda de água branca no processo são:

- a) Água das bombas de vácuo das caixas de sucção das máquinas na chamada “parte úmida” da máquina;
- b) Purga da água desaguada pela Prensagem;
- c) Transbordos e drenagens de tanques ou linhas onde a água contém fibras;
- d) Descontroles e falhas operacionais;
- e) Falta de treinamento ou nível e comprometimento abaixo do esperado do pessoal de operação da máquina;
- f) Excesso de atividades dos operadores;
- g) Condições operacionais inadequadas;
- h) Máquina operando acima da sua capacidade nominal de Projeto;
- i) Metodologia inadequada para a realização de trabalhos no Processo, manutenção, e outras disciplinas;
- j) Cultura do desperdício, em todos os níveis, levando toda a cadeia produtiva e de outras equipes envolvidas a não se importarem com os recursos naturais;

- k) Falta de instrumentos para monitorar consumos de variáveis de processo;
- l) Falta de indicadores e metas sobre perdas.

Segundo Filho, Cesar de Araujo Góss; Leitis, G. A. (2013), pelo ponto de vista do correto funcionamento do sistema de vácuo, que elimina grande parte da água no processo e um dos grandes responsáveis pela energia elétrica consumida (cerca de 20% do total, ou 1/3 do total consumido na seção de formação do papel, na caixa de entrada e mesa plana) tem como principais causas de problemas desse importante sistema:

- a) Se as bombas não produzem vácuo:
 - Bomba com rotação invertida;
 - Baixo fluxo e/ou alta temperatura da água de selagem;
 - Sucção fechada;
 - Saída das bombas pressurizadas;
- b) Se o vácuo é insuficiente:
 - Fluxo e/ou temperatura da água de selagem fora dos parâmetros de operação;
 - Fluxo de água de serviço fora dos parâmetros de operação;
 - Baixa rotação das bombas;
 - Entrada de ar de forma inadequada no sistema (problema de gaxeta, por exemplo);
 - Linhas de sucção obstruídas ou com entrada de ar de forma inadequada;
 - Problema no conjunto mecânico do sistema de vácuo;
 - Dimensionamento incorreto;
- c) Motor da bomba de vácuo com alto consumo de energia:
 - Vácuo acima do recomendado pelo fabricante da máquina;
 - Alto fluxo e/ou temperatura elevada da água de selagem;
 - Saída das bombas de vácuo pressurizadas;
 - Rotação elevada das bombas de vácuo;

Como todo o sistema da máquina de papel trabalha em balanço, isto é, os sistemas da Mesa Plana, Prensagem e Secagem com os seus papéis definidos pelo

ponto de vista da retirada de água da folha em produção, e se ocorre, por exemplo, um desbalanço no início do processo (mesa plana), para que a qualidade do produto seja mantida, faz-se necessário consumir mais energia na prensagem e/ou na secagem, gastando assim mais energia em forma de vapor (no caso da secagem), ainda sob o risco de não atingir o grau de qualidade do produto e ao mesmo tempo ter um índice maior de quebra de folha na máquina, causando mais interrupções na fabricação.

1.1.7 O uso de tecnologias da Indústria 4.0 para melhora de processos industriais em Papel e Celulose

Segundo Barbeli, M. C. (2005), a máquina de papel é um equipamento que tem um grande potencial de realização de conservação de energia, seja ela térmica ou elétrica. Ações que envolvem a melhor utilização do vapor no sistema de secagem, a reciclagem de água em pontos específicos, e somadas à outras, é possível a economia de até 1GJ/t de celulose processada. Assim, até mesmo a produção de vapor, a produção de água fresca, e a utilização de energia elétrica tem potencial para um consumo consciente e otimizado.

Segundo Adeogun, A. I.; Bhagawati, P. B.; Shivayogimath, C. B. (2021), a aplicação de redes neurais para a mitigação da remoção de poluentes e consumo de energia em célula eletroquímica para tratamento de efluentes de processos de polpação já é uma realidade.

O uso de tecnologias disruptivas foi alvo de um estudo por LI X. et al. (2021), com a proposta de aplicação da tecnologia Deep Learning desenvolvida para a simulação da complexa dinâmica de um sistema de tratamento de água de efluentes do processo de fabricação de papel.

Outro exemplo proposto por Sierla S. et al. (2021) propõe uma metodologia para geração de um Digital Twin para uma planta “browfield”, e para a indústria de papel e celulose, a simulação de processos tem sido aplicada para otimização de consumos de água, minimizar o uso de energia, e avaliar os consumos de químicos no processo.

Percebe-se assim, que a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 já é uma realidade para a mitigação do problema do desperdício de água e energia em fábricas

de papel, e o uso de simulações de processo já são empregadas em sistemas de tratamento de água.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As novas demandas do mercado para uma produção cada vez mais eficiente e sustentável exigem uma rápida adaptação das empresas no uso de tecnologias e gestão que irão garantir a maior produtividade e qualidade com os menores custos e prazos de entrega.

Nesse contexto, o processo produtivo de fabricação de papel possui diversos ajustes para controles do vácuo na caixa de entrada, temperatura de secagem, velocidade, dosagem de químicos, entre outros, levando o time da operação focar e garantir a disponibilidade da máquina para o maior grau de produtividade e qualidade, com os menores custos e prazos de produção.

Como consequência, os consumos de insumos necessários ao processo, dentre eles a água, vapor e energia, são usualmente monitorados durante ou após o seu uso, podendo ocasionar algumas vezes a sua utilização de uma forma não otimizada, elevando assim os custos finais de produção. Adicionalmente, o planejamento prévio da utilização desses insumos é necessário, trazendo assim uma melhor visibilidade dos consumos em todas as situações do processo, incluindo as quebras de folha e paradas programadas.

Em resumo, forma-se então a pergunta chave para balizar os objetivos dessa pesquisa: Como o uso de tecnologias de Modelos Digitais da Indústria 4.0 pode contribuir para uma melhor gestão e predição de consumos de água, vapor e energia em Máquinas de Papel?

1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa foi embasada em um objetivo geral e um conjunto de objetivos específicos, que serão detalhados a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

Criação de um framework (modelo) que permitirá a replicação da ferramenta de gestão dos consumos de água, vapor e energia, que seja intuitiva e de fácil uso e fácil utilização para a clareza na leitura dos dados, e que permita aos grupos de Operação e Gestão identificar possibilidades de otimização do uso desses recursos, bem como proporcionar um planejamento prévio de suas utilizações.

1.3.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram mapeados:

- a) Realização de Pesquisa Científica: através da metodologia RBS (Revisão Bibliográfica Sistemática) e RBA (Revisão Bibliográfica Assistemática), buscando referências de fabricantes de máquinas de papel, publicações em revistas técnicas, artigos acadêmicos, entre outras publicações, que embasem questões de consumos de água, vapor e energia em fábricas de papel e o uso da tecnologia Digital Twin e de simulação de processos em plantas industriais, buscando a base teórica para a realização dos trabalhos;
- b) Realização de uma PoC (Prova de Conceito): com o uso da pesquisa científica realizada e os dados históricos do Sistema PIMS da Máquina de Papel 16 (MP-16) em Correia Pinto/SC, utilizando-os adequadamente para a criação de:
 - Uma ferramenta de visualização de KPIs de consumos de água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão, e energia;
 - Uma ferramenta de visualização dos custos associados dos consumos de água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão e energia;
 - Uma ferramenta de simulação de cenários de consumos de água, vapor média pressão, vapor de baixa pressão e energia, de acordo com o plano de produção em peso de produtos;
 - Um framework para a replicação das ferramentas de visualização e gestão desenvolvidas nessa pesquisa;

Consolidando-se a base teórica estudada, e observando o resultado da PoC, espera-se a criação de uma visão estratégica da utilização desses insumos (água,

vapor e energia) pelo ponto de vista financeiro para o time de gestão, e uma visão operacional para o time de operação. Após avaliar o grau de sucesso desse Projeto, em uma fase futura, realizar os ajustes necessários, e deixar disponível em definitivo para a utilização.

Em seguida, consolidando-se a base teórica estudada e observando os resultados práticos obtidos com a PoC, espera-se obter a criação de um framework para a replicação do conjunto de soluções concebidas e aplicadas na prática encontradas nesse estudo.

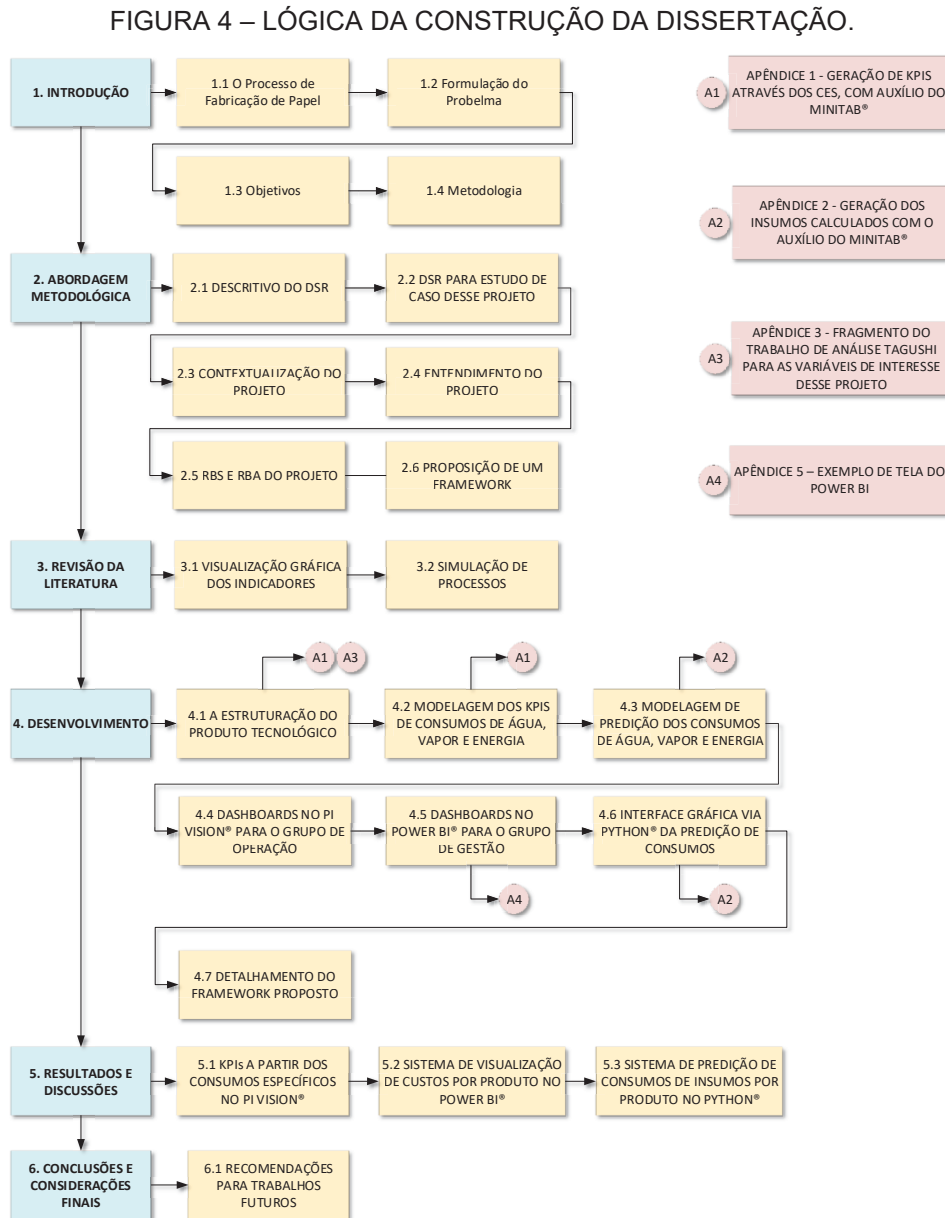
1.4 METODOLOGIA

Esta pesquisa foi subdividida em itens específicos:

- a) O Capítulo 1 (Introdução) contextualiza o leitor para o entendimento resumido sobre o processo de fabricação de papel, o problema proposto, a descrição dos objetivos desse trabalho e um breve resumo (este) de como o trabalho está organizado.
- b) O Capítulo 2 (Abordagem Metodológica) explica como o DSR foi realizado, contextualizando o objeto do projeto, a formação do RBS, que foi gerado em duas partes, o RBA, e uma proposição inicial para o framework.
 - O Capítulo 3 (Revisão da Literatura) aborda a base teórica que suporta essa pesquisa, dividido nas partes abaixo,
 - A utilização de ferramentas de visualização gráfica em ambientes de operação e gestão de processos;
 - O uso da ciência de análise de dados para a geração dos indicadores e a simulação de processos;
 - O uso da tecnologia da Simulação de Processos como desdobramento do Digital Twin em Sistemas Cyber Físicos aplicados na otimização de processos e planejamento da produção;
- c) O Capítulo 4 (Desenvolvimento) explora o produto tecnológico desenvolvido, com a descrição das ferramentas desenvolvidas, bem como o detalhamento do framework concebido;
- d) O Capítulo 5 (Resultados e Discussões) mostra os resultados alcançados, criando a base de discussão para as conclusões finais;

- e) O Capítulo 6 (Conclusões e Considerações Finais) traça as conclusões dessa pesquisa, enumerando os sucessos e as pontos que eventualmente não foram exitosos, bem como forma as observações e conclusões finais e as recomendações, direcionando os trabalhos futuros;
- f) Os Apêndices formam os detalhes específicos desse trabalho, formando a base para os tópicos principais abordados, com o objetivo de não tirar o foco do leitor dos pontos principais dessa pesquisa;

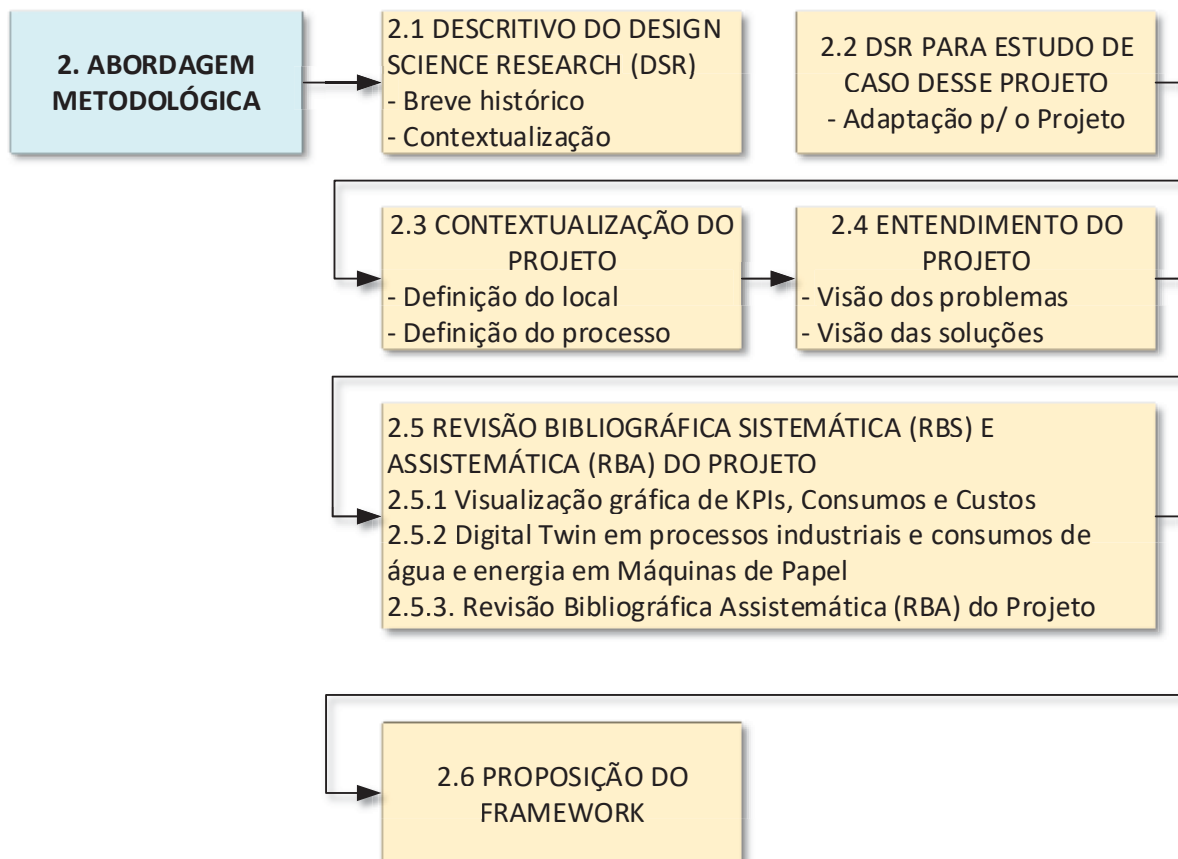
A FIGURA 4 abaixo mostra todos os passos dessa pesquisa:



2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

As seguintes etapas serão consideradas nesse capítulo, conforme FIGURA 5 abaixo:

FIGURA 5 – ETAPAS DA ABORDAGEM METODOLÓGICA



FONTE: O Autor (2023).

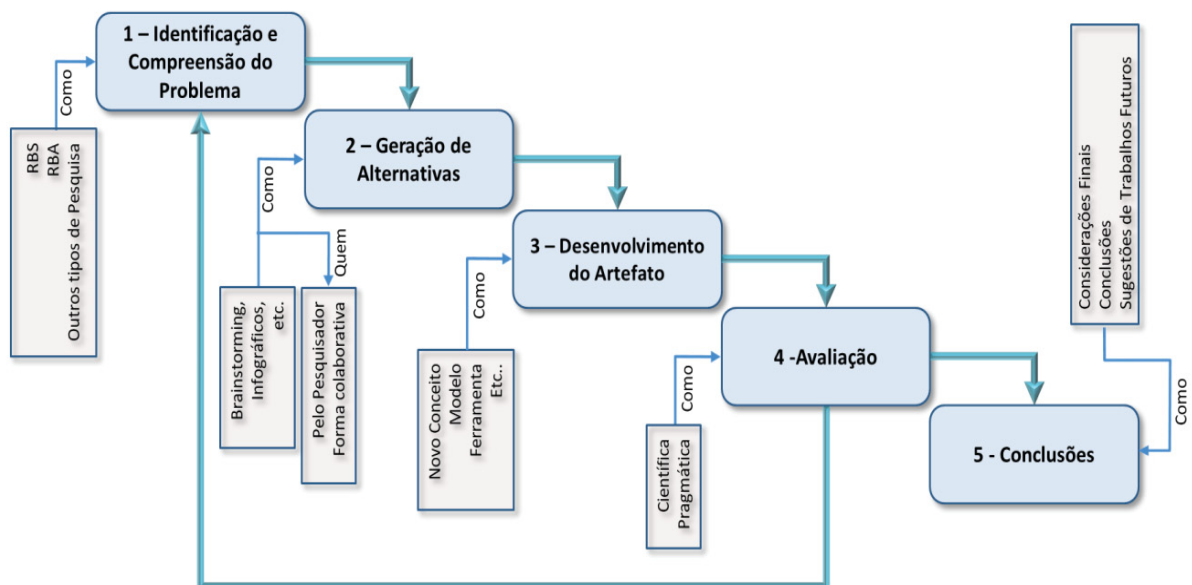
2.1 DESCRITIVO DO DESIGN SCIENCE RESEARCH (DSR)

O Discurso do Método, escrito por René Descartes, com a sua primeira publicação ocorrida em 1637, retrata com perfeição a visão que “um pesquisador deve nunca aceitar, por verdadeira, coisa nenhuma que não conhecesse como evidente, isto é, deve evitar cuidadosamente a precipitação e a prevenção, e nada incluir em seus juízos que não se apresentasse tão claramente e tão distintamente ao seu espírito que não tivesse nenhuma ocasião de o pôr em dúvida...”.

A palavra “Método” vem do grego “*methodos*”, significando “identificar o caminho” mais adequado para a realização de uma pesquisa. “Design Science Research” é um método de pesquisa onde são desenvolvidas e avaliadas a eficiência e eficácia de um artefato na solução de uma categoria de problema. Sua característica construtiva e prospectiva, buscando estabelecer o “como deveria ser” contrasta com a característica analítica de outros métodos para o entendimento de “como é” o mundo real na prática.

Esta metodologia de pesquisa é adequada em um projeto quando há a criação de um artefato para a promoção de melhorias no mundo real presente ou futuro, aplicado em contexto de cooperação ou não com os atores envolvidos, sendo a efetividade do artefato em alcançar tais melhorias o foco do estudo. DOS SANTOS, AGUINALDO (2018).

FIGURA 6 – CICLO DE ETAPAS DA PESQUISA EM DESIGN SCIENCE.



FONTE: Dos Santos, Aguinaldo (2018).

Ainda segundo Dos Santos, Aguinaldo (2018), essa metodologia tem por princípio estabelecer uma rotina de atividades buscando a melhor organização do estudo a ser realizado. Abaixo, segue um resumo de atividades previstas, segundo demonstrado pela FIGURA 6, por etapas:

- Fase 1 - A identificação e compreensão do problema podem ser facilitadas pela realização de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) e Revisão

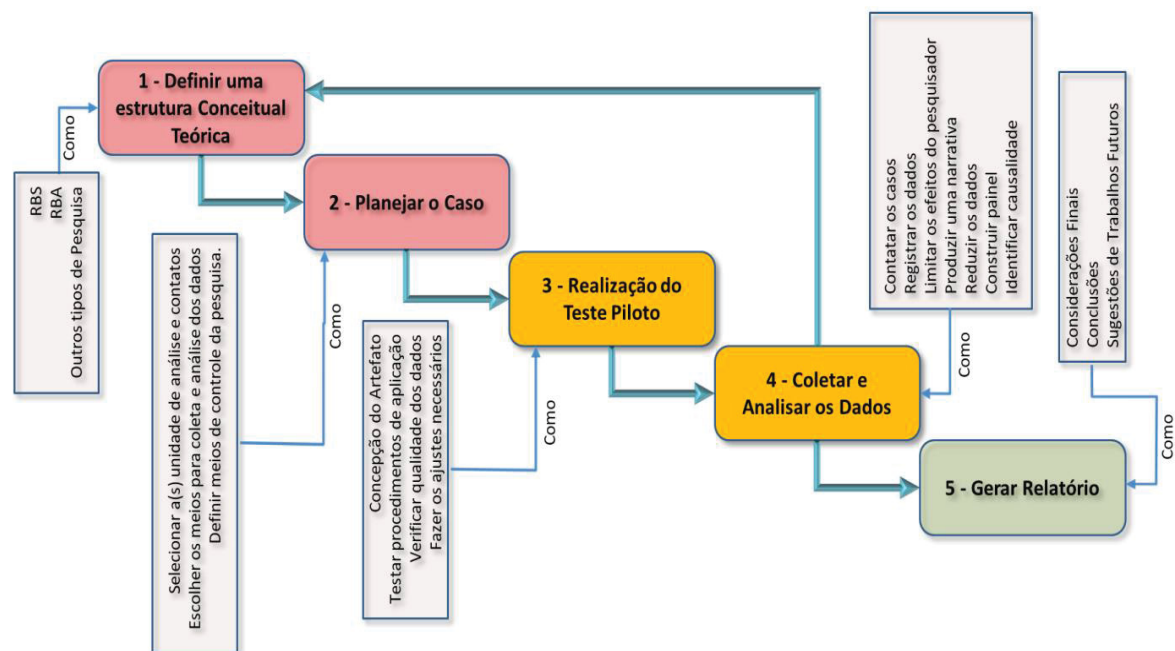
Bibliográfica Assistemática (RBA) assim como pela realização de estudos através de outros métodos de pesquisa.

- b) Fase 2 – Geração de Alternativas: É um processo essencialmente criativo e pode ser realizado de forma solitária pelo próprio pesquisador ou de forma colaborativa, envolvendo outros pesquisadores e os próprios atores relacionados ao problema ou à solução. As técnicas convencionais de criação utilizadas pelo Design são possíveis de adoção nesta etapa (ex: Brainstorming) assim como técnicas de representação de alternativas (ex: storyboards, infográficos).
- c) Fase 3 – Desenvolvimento do Artefato: o “artefato” inclui desde o desenvolvimento de um novo conceito, modelo, ferramenta, método ou mesmo a “tangibilização” destes em um novo produto físico/digital, serviço ou sistema, no conceito do design vernacular. Um novo conceito, uma nova ferramenta ou método podem estar orientados para a utilização de produtos existentes, não incorrendo necessariamente no desenvolvimento de um novo produto.
- d) Fase 4 – Avaliação: O método da Design Science busca tanto a validade científica (rigor na concepção e condução da pesquisa) como a validade pragmática (eficácia e efetividade das soluções). A etapa de Avaliação tem como meta principal confrontar a proposição prescritiva de natureza teórico-prática, consubstanciada no “artefato”, com sua efetividade no mundo real.
- e) Fase 5 – Conclusões: Uma vez encerrado o(s) ciclo(s) de avaliação(ões) as considerações finais e conclusões do estudo são então realizadas. Recomenda-se que as conclusões foquem no problema central da pesquisa e seus correspondentes objetivos, sintetizando de forma textual ou visual as lições aprendidas nas fases do projeto, apontando as contribuições do trabalho para a Classe de Problemas identificada na etapa de Compreensão do Problema. Nas sugestões para trabalhos futuros os pesquisadores podem apontar o estudo de novos problemas ou novas soluções.

2.2 DSR PARA O ESTUDO DE CASO DESSE PROJETO

Segundo Dresch et al (2015), um dos problemas com que os pesquisadores deparam é relativo à seleção da abordagem metodológica da pesquisa. Existem premissas e restrições para a escolha de cada método adotado e elas devem ser levadas em consideração. Depois de identificadas as lacunas de pesquisa, a partir da literatura, e desenvolvida a(s) questão(ões) da pesquisa, o pesquisador analisa as possíveis abordagens a serem utilizadas, selecionando aquela que for mais apropriada, útil e eficaz para endereçar essa(s) questão(ões). Neste sentido, quando pensamos em um estudo de caso, objeto desse trabalho, a adoção de uma abordagem deve atender a questão de pesquisa para aumentar as chances de endereçar a proposta. Segue abaixo, na FIGURA 7, uma proposta de conteúdo para a condução de um estudo de caso, adaptado pelo Autor (2022):

FIGURA 7 – DSR PARA ESTUDO DE CASO.



FONTE: Dresch et al. (2015) e O Autor (2022).

Conforme ajustado pelo Autor (2022), a fase de reavaliação imaginada por Dresch et al (2015) viria da Fase 3 (Realização de Teste Piloto ou PoC), porém entende-se que há necessidade de nova coleta e análise dos dados (Fase 4) acontecer, para esse ciclo se fechar. Abaixo, segue um resumo de atividades, por etapas:

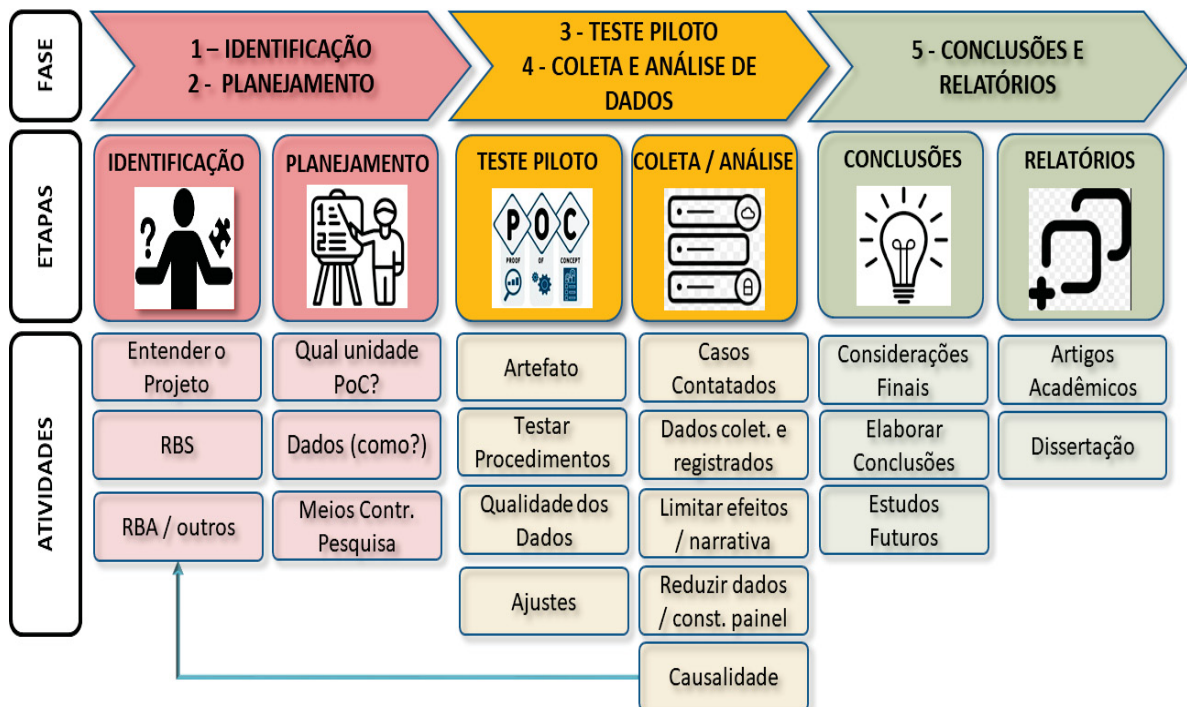
- a) Etapa 1 – Definir estrutura conceitual teórica: Primeiro deve ser desenvolvido um referencial mapeando a literatura sobre o tema. Além disso, a partir da revisão da literatura, é possível identificar lacunas nas quais a pesquisa pode ser justificada, bem como possibilita extrair os constructos: elementos extraídos da literatura que representam um conceito a ser verificado em campo.
- b) Etapa 2 – Planejar os casos: No que se refere ao planejamento dos casos, é necessário realizar a escolha da(s) unidade(s) de análise, ou seja, do(s) caso(s). Em um primeiro momento deve ser determinada a quantidade de casos, único ou múltiplo casos com vantagens e dificuldades em cada um desses tipos, selecionando a(s) unidade(s) de análise e contatos, escolhendo os meios para coleta e análise dos dados, desenvolvendo o protocolo para a sua coleta, e definindo os meios de controle da pesquisa.
- c) Etapa 3 – Realização do Teste Piloto: Outra etapa prevista pelo método é a condução de um teste piloto que, embora não seja uma prática comum na adoção de estudo de caso, é importante que seja conduzido pelo pesquisador antes mesmo da coleta de dados, realizando a concepção do artefato, tentando procedimentos de aplicação, verificando a qualidade dos dados, e fazendo os ajustes necessários, após a coleta e análise de dados (Etapa 4).
- d) Etapa 4 – Coleta e análise dos dados: Primeiramente, os casos devem ser contatados, considerando os principais informantes que estão cientes da pesquisa. Antes de ir a campo, é importante ter uma estimativa clara do tempo a ser despendido e dos recursos a serem consumidos. Os dados devem ser coletados e registrados utilizando os instrumentos definidos no planejamento. Os registros em gravador trazem uma série de vantagens no sentido da melhoria da precisão na análise posterior, porém podem inibir o entrevistado. As anotações também são importantes, bem como todas e quaisquer impressões e observações. A coleta deve ser concluída à medida que a quantidade de dados e de informações tende a se reduzir e/ou quando se consideram dados suficientes para endereçar a questão da pesquisa. O pesquisador deve então produzir uma narrativa geral do(s) caso(s). Em geral, é necessário fazer uma redução de dados (data reduction), ou normalização dos dados, de tal forma que seja incluído na

análise, somente o que é essencial e que tem estreita ligação com os objetivos e constructos da pesquisa, que devem ser colocadas em um ou mais arquivos eletrônicos. As anotações e gravações devem ser estruturadas conforme o protocolo de pesquisa (Causalidade). Dados secundários também podem ser utilizados. Após essa fase, em caso de necessidade de ajustes, volta-se à Etapa 2.

- e) Etapa 5 – Conclusões e Geração de Relatório: O autor interpreta os dados coletados, nos seus pontos positivos e negativos, sintetiza essas informações das atividades das etapas anteriores em um relatório da pesquisa. Esse relatório é o gerador (isto é: não é sinônimo) de uma monografia (tese ou dissertação) e/ou de artigos (para congressos, revistas especializadas ou periódicos).

As etapas descritas na metodologia DSR, adaptada para esse Projeto, podem ser visualizadas na FIGURA 8 abaixo:

FIGURA 8 – DSR PARA ESTE PROJETO.



FONTE: Dresch et al. (2015) e O Autor (2022)

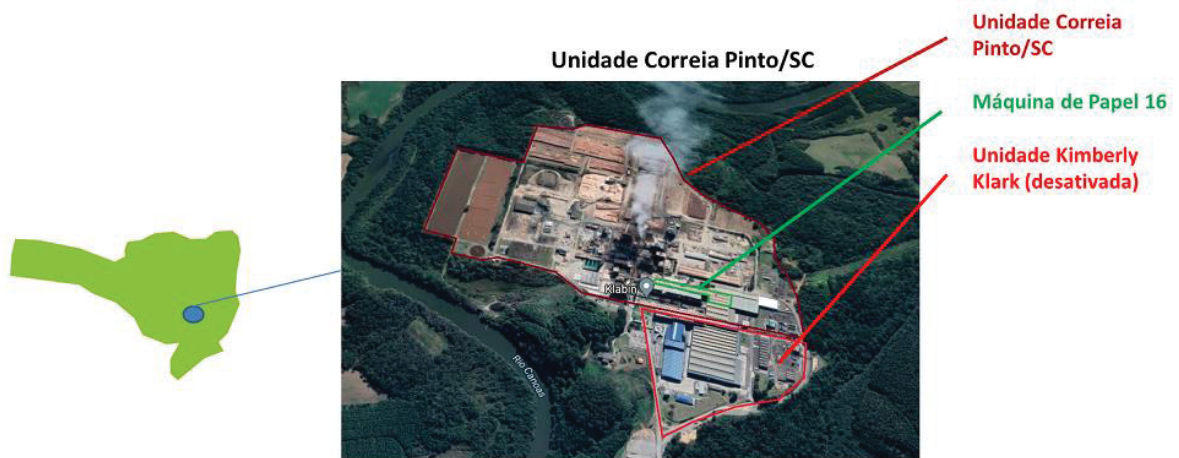
As atividades desse DSR serão descritas em mais detalhes nos próximos capítulos.

2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO

A Klabin S.A. possui 120 anos de história, sendo a maior exportadora de papéis do Brasil, com 24 fábricas, inclusive uma na Argentina,

E pela importância no processo, foi escolhida a unidade de Correia Pinto em Santa Catarina para a execução desse Projeto.

FIGURA 9 – UNIDADE KLABIN CORREIA PINTO/SC.



FONTE: Klabin e O Autor (2022)

De acordo com o time técnico de Engenharia local, foi eleita a MP-16 para ser a primeira área da fábrica para testar o novo conjunto de filosofias, pelo fato de ser a que tem o maior índice de instrumentação presente. A FIGURA 10 abaixo traz uma visão macro dessa parte do processo:

FIGURA 10 – PARTES DA MP-16 NA UNIDADE KLABIN CORREIA PINTO/SC.



FONTE: O Autor (2022)

Pela dimensão e importância do Projeto para a Klabin, foram envolvidas pessoas do grupo de produção e Gestão da MP-16, pessoal de desenvolvimento de processos (especialistas nos processos industriais da Klabin), o especialista da unidade na administração do sistema PI (PI System®), suportado pelo pessoal de TI local, o time da TI corporativa, e o pessoal de TI infraestrutura.

2.4 ENTENDIMENTO DO PROJETO

Entendendo as dores do pessoal de Operação e Gestão da MP-16, é importante que seja analisada a rotina: no dia a dia da operação, os consumos de insumos, especialmente para a água, vapor e energia, são usualmente monitorados após o seu uso, por vários motivos. Dentre eles, destacam-se:

- a) A disponibilidade dos equipamentos que compõem a Máquina de Papel e a qualidade da produção final tem prioridade;
- b) Alta quantidade de equipamentos para monitorar;
- c) O controle do processo não é simples;
- d) Número elevado de atividades do pessoal da Operação;

Excluindo-se as questões acima e como os dados de processo e de custos não estão disponíveis ao mesmo tempo para essa operação, a gestão financeira normalmente acontece na fase de planejamento no início de cada ciclo (semanal e mensal), e depois avaliada ao final de cada ciclo, pois a prioridade da gestão e operação da máquina está na disponibilidade, qualidade e atendimento à carteira de pedidos, nos prazos determinados. Dessa forma, para a mitigação dos problemas acima identificados, o sistema proposto deverá:

- a) Dar uma visão simplificada para a Operação dos consumos específicos de água, vapor e energia por ciclo de produção, mostrando o consumo adicional ou abaixo do necessário;
- b) Gerar uma visão financeira para a Operação e Gestão dos consumos e água, vapor e energia por ciclo de produção, mostrando o custo do consumo adicional (ou desnecessário) ou custo salvo desses insumos;
- c) Possibilitar uma previsão de consumos de água, vapor e energia de acordo com o planejamento de produção;

2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS) E ASSISTEMÁTICA (RBA) DO PROJETO

O RBS desenvolvido para esse Projeto foi dividido em duas partes para atender o escopo global de busca de artigos acadêmicos necessários, com duas vertentes distintas de perguntas chaves que guiaram a pesquisa.

Por outro lado, o trabalho desenvolvido do RBA procurou selecionar artigos acadêmicos conectados neste trabalho pelas palavras-chave definidas no RBS, não importando a origem do campo da área de pesquisa ou o ano da publicação, pois traziam elementos importantes para a construção do entendimento desse trabalho.

Os resultados obtidos com as duas vertentes do RBS e o RBA utilizaram as bases de dados Scopus® e Web of Science®.

2.5.1 O Digital Twin em processos industriais e consumos de água e energia em Máquinas de Papel (RBS 1)

As seguintes perguntas balizaram a busca das palavras-chave:

- a) Pergunta 1: Quais são as possibilidades para economia de água e energia em máquinas de papel?
- b) Pergunta 2: Como a tecnologia Digital Twin pode ser utilizada para a simulação e predição de processos industriais?

De uma forma intuitiva, as perguntas acima levaram essa pesquisa RBS ser conduzida em uma relação de intersecção entre a Pergunta 1 e Pergunta 2, porém, a pesquisa trouxe resultado nulo nas buscas das bases de dados, sugerindo que as perguntas relacionadas não possuíam afinidade devido à novidade do tema. Dessa forma, a RBS para as perguntas acima foi conduzida de forma individual.

Em relação metodologia de aplicação da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), existem quatro estágios: Identificação Preliminar, Pesquisa, Elegibilidade e Inclusão. MENGIST, W., SOROMESSA, T., & LEGESE, G. (2020). No primeiro estágio (Identificação), conjuntos resumidos de strings sinônimos foram escolhidos a partir de um exercício com as próprias perguntas que guiaram esta pesquisa,

identificando-se assim as strings principais, as strings possíveis e as strings sinônimos.

Adicionalmente, a sistemática proposta por Mengist, W.; Soromesa, T., & Legese, G. (2020), proporcionou uma variedade de combinações de argumentos lógicos “OR” e “AND” em combinação com argumentos específicos por palavras-chave identificadas pelos autores, limitando as pesquisas por artigos publicados entre 2017 até 2022, com algumas restrições (Áreas de assunto: “Environmental Science”, “Engineering”, “Energy”, “Computer Science”; “Multidisciplinary”; Artigos com acesso aberto; Strings constantes nos títulos), sempre utilizando a língua inglesa.

Como resultado, os seguintes artigos foram considerados, selecionados da fase de inclusão (final) e que fazem parte desse trabalho, conforme a TABELA 4 abaixo:

TABELA 4 – PERGUNTAS, STRINGS/ARGUMENTOS E RESULTADOS (RBS1).

Perguntas	Strings e argumentos	Resultados
Pergunta 1	((water) AND (econom* OR conservation OR consumption OR waste OR saving*) AND (energ*) AND ("paper machin*" OR "paper industr*" OR "paper mill*" OR "papermaking machine*" OR "papermaking**"))	Id. Preliminar: 1343 Pesquisa: 144 Elegibilidade: 47 Inclusão: 18
Pergunta 2	OR (("digital twin*" OR "digital shadow*") AND (simulat* OR train*) AND ("predict*" OR forecast*) AND ("industrial process*" OR "production process*" OR "continuous process" OR "batch process*" OR manufacturing))	

FONTE: O Autor. (2022).

2.5.2 Visualização gráfica de KPIs aplicados em Papel e Celulose (RBS 2)

As seguintes perguntas balizaram a busca das palavras-chave:

- a) Pergunta 1: Quais os principais indicadores aplicados à indústria de papel e celulose?
- b) Pergunta 2: Quais as melhores formas de visualização gráfica para indicadores de processo ou consumo?

Assim como a RBS 1, também foi usada a sistemática proposta por Mengist, W.; Soromesa, T., & Legese, G. (2020), utilizando-se uma variedade de combinações

de argumentos lógicos “OR” e “AND” em combinação com argumentos específicos por palavras-chave identificadas pelos autores, limitando as pesquisas por artigos publicados entre 2017 até 2022, com algumas restrições (Áreas de assunto: “Environmental Science”, “Engineering”, “Energy”; Artigos com acesso aberto; Strings constantes nos títulos), sempre utilizando a língua inglesa.

Como resultado, os seguintes artigos foram considerados, selecionados da fase de inclusão (final) e que fazem parte desse trabalho, conforme a TABELA 5 abaixo:

TABELA 5 – PERGUNTAS, STRINGS/ARGUMENTOS E RESULTADOS (RBS2).

Perguntas	Strings e argumentos	Resultados
Pergunta 1	((KPI) OR ("Key Performance Indicator*") OR ("Performance Indicator*") OR ("Performance Measurement System") OR ("Performance Measurement") OR ("Performance Evaluation") OR ("Performance Analysis")) AND ((pulp) OR (P&P) OR ("Pulp and Paper"))	Id. Preliminar: 1127 Pesquisa: 73 Elegibilidade: 21 Inclusão: 6
Pergunta 2	AND ((Gauge) OR (Scale) OR (likert) OR (Visual*))	

FONTE: O Autor. (2022).

2.5.3 Revisão Bibliográfica Assistemática (RBA) do Projeto

Como já comentado, o trabalho de pesquisa da RBA procurou buscar fontes de informações não importando a origem do campo da área de pesquisa ou o ano da publicação, pois poderiam trazer elementos importantes para a construção do entendimento desse trabalho. Além disso, foi realizada uma pesquisa utilizando Google Search® de materiais gerados a partir de publicações não acadêmicas, como por exemplo:

- a) Publicações de congressos, feiras científicas e eventos da área de tecnologia;
- b) Materiais de divulgação e especificações técnicas de empresas;
- c) Materiais acadêmicos de universidades;
- d) Livros publicados embasando as tecnologias e técnicas aplicadas neste trabalho;
- e) Outros: Materiais desenvolvidos por organizações conectadas às empresas produtoras de papel e celulose;

Ilustrando esse entendimento, seguem abaixo alguns exemplos das pesquisas realizadas, com o emprego de algumas das palavras chaves utilizadas anteriormente no RBS, conforme a FIGURA 11 abaixo:

FIGURA 11 – EXEMPLOS DE PESQUISAS RBA DESTE TRABALHO.



FONTE: O Autor (2022).

2.6 PROPOSIÇÃO DE UM FRAMEWORK

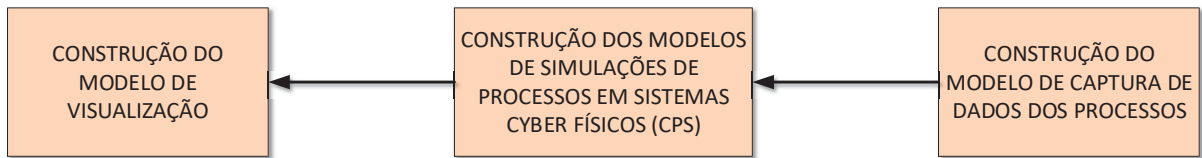
Com o objetivo da construção de um framework ou um modelo para futuras implementações das soluções que serão apresentadas no capítulo Desenvolvimento, as pesquisas realizadas com as duas Revisões Sistemáticas Bibliográficas (RBS 1: O Digital Twin em processos industriais e consumos de água e energia em máquinas de papel; RBS 2: Visualização gráfica de KPIs aplicados em Papel e Celulose) e da Revisão Bibliográfica Assistemática, tiveram contribuições para uma discussão preliminar desse modelo.

Segundo definições de Bach, B. et al. (2022), as melhores construções de visualizações e KPIs de processos industriais sugerem padrões baseados em simplicidade e mostra as melhores práticas da construção de dashboards.

Paralelamente, Tao, Fei et al. (2019), Yu, H. et al. (2021) e Zhao, P. et al. (2020), propõem em etapas e visões distintas dessa pesquisa formas de aquisição de dados e a utilização do Digital Twin em Sistemas Cyber Físicos (CPS).

Assim, uma primeira visão de um framework desse estudo pode ser visualizada na FIGURA 12 abaixo, com a construção dos seguintes artefatos:

FIGURA 12 – FRAMEWORK PRELIMINAR DO ESTUDO.



FONTE: O Autor (2023).

Os estudos para o detalhamento desse framework deverão ser detalhados ao final da realização da PoC objeto desse Projeto, para melhor balizar a proposta.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Conforme sinalizado no capítulo dos Objetivos Geral e Específicos, a proposta técnica indicada no capítulo da Formulação do Problema é a geração de uma ferramenta de indicadores específicos de consumos e a simulação de situações futuras baseadas em dados históricos, que permitirá aos operadores a mitigação de eventuais excessos de consumos de água, vapor e energia durante o processo produtivo, e ao mesmo tempo, irá permitir a visualização de cenários de custos de produção em períodos futuros, bem como a construção de um framework.

Abordaremos aqui a base teórica que norteia essa pesquisa nos seguintes tópicos:

- a) Visualização gráfica de indicadores;
- b) Simulação de processos;

Como condição preliminar à base teórica proposta, o uso da ciência de análise de dados para a geração dos indicadores e a simulação de processos são primordiais neste trabalho, uma vez que o conjunto de soluções tecnológicas pressupõe que os dados coletados foram tratados, são íntegros, confiáveis, e prontos para a obtenção de resultados, constituindo a técnica da mineração de dados, e a sua posterior transformação na inteligência e aplicação dos resultados esperados.

Segundo de Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016), a mineração de dados surgiu como área de pesquisa e aplicação independente em meados da década de 1990, mas suas origens na matemática, estatística e computação são muito anteriores a esse período. A área também ganhou evidência nos últimos anos depois de ser cunhado o termo Big Data, e também com a publicação do relatório intitulado “Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity” pelo McKinsey Global Institute, em meados de 2011.

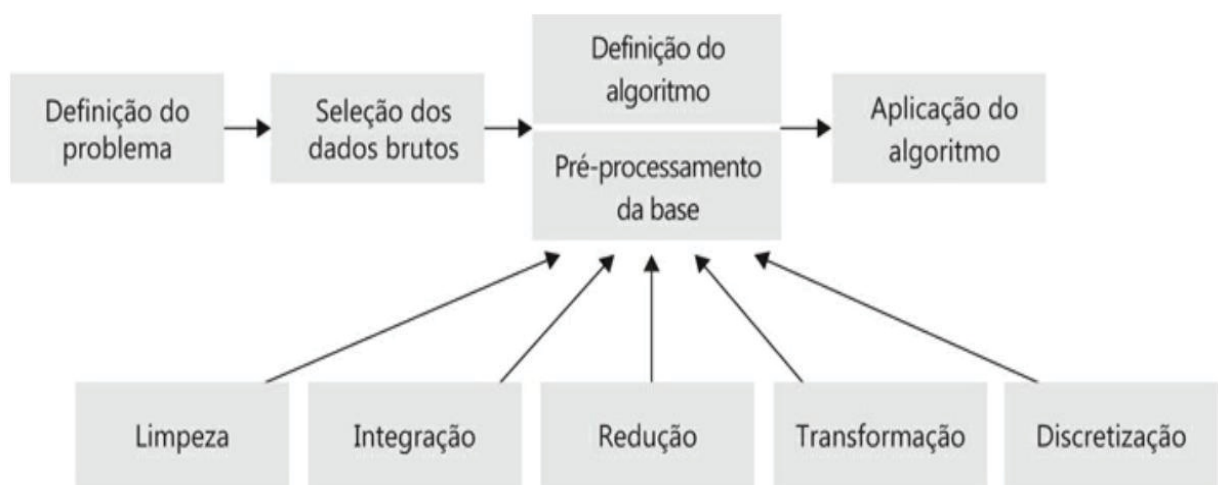
Segundo Siegel, A. F., (2016), quando existe uma grande e complexa montagem de muitas e pequenas peças de informação, muitas vezes soltas e desconexas, a estatística pode ajudar na classificação e análise da situação, provendo uma visão geral e um sumário de recursos fundamentais nos dados. Por outro lado, a estatística tem a atenção apropriada para todos os indivíduos foco da análise, alertando para qualquer exceção.

Segundo Hendrickx, T. et al. (2015), existe uma necessidade urgente para uma nova geração de teorias computacionais e ferramentas para dar ajuda na extração de informações úteis (conhecimento), pelo rápido crescimento do volume dos dados disponíveis. Estas teorias e ferramentas são a base de discussão do campo da descoberta de conhecimento em bases de dados (Knowledge Discovery in Databases - KDD).

Em um nível abstrato, o campo de conhecimento do KDD é preocupado e focado com métodos de desenvolvimento e técnicas que fazem sentido aos dados. O problema básico endereçado pelo processo é um mapa de detalhes dos dados de baixo nível (que são tipicamente muito volumosos para entender e digerir) para outras formas que podem ser muito mais compactas, mais abstratas, e mais úteis. HENDRICKX, T. et al. (2015).

Segundo de Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016), a primeira atividade em uma visão abrangente do processo de preparação de dados para análise, é definir o problema a ser resolvido, e com base nele, os dados necessários são selecionados na análise. Em seguida, duas etapas são realizadas parcialmente e em paralelo, definindo-se um ou mais algoritmos de mineração de dados para serem aplicados e, em função deles, algumas etapas de pré-processamento são empregadas na preparação dos dados. Nem todas as etapas de pré-processamento são diretamente dependentes do algoritmo a ser usado. A FIGURA 13 abaixo demonstra um framework de preparação da base de dados para a obtenção do conhecimento:

FIGURA 13 – FRAMEWORK DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DOS DADOS.



FONTE: De Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016).

Ainda segundo de Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016), as principais etapas do pré-processamento são:

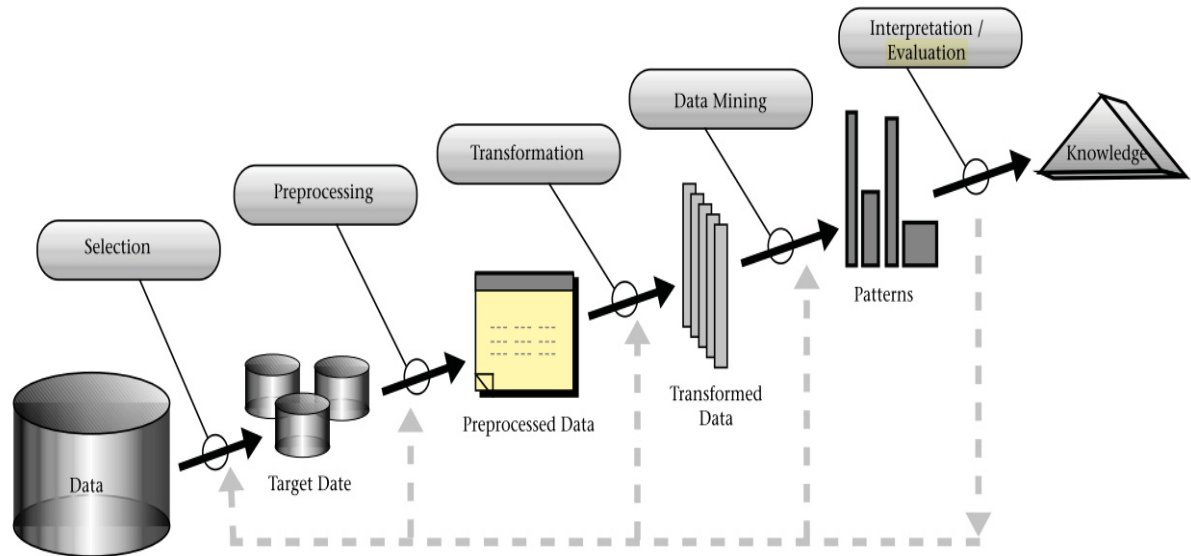
- a) Limpeza: remoção de ruídos falhas de comunicação, correções, inconsistências, valores discrepantes (outliers), imputação de valores ausentes;
- b) Integração: fase para união de dados de múltiplas fontes em um único local (data warehouse);
- c) Redução: para reduzir a dimensão da base de dados, agrupando ou eliminando atributos redundantes, para reduzir a quantidade de objetos na base, resumizando, integrando os dados;
- d) Transformação: padronizar e deixar os dados em um formato passível de aplicação de diferentes técnicas de mineração;
- e) Discretização: permitir que métodos que trabalham com atributos nominais possam ser empregados a um conjunto maior de problemas, contribuindo para que a quantidade de valores para um dado atributo seja reduzida;

Na mesma linha, Hendrickx, T. et al. (2015) possui a visão de um framework semelhante e mais resumido para a obtenção do conhecimento a partir dos dados brutos:

- a) A seleção dos dados (pressupõe-se que se conheça a relevância dos dados selecionados para a análise);
- b) O pré-processamento (com a utilização de algoritmos de filtragem, seleção, exclusão de outliers, dados duplicados, etc.);
- c) Transformação (com métodos de redução do número de variáveis sobre consideração);
- d) Data Mining (passo no processo KDD que consiste na aplicação da análise de dados e descoberta de algoritmos que, sobre limitações computacionais aceitáveis, produzem uma numeração particular de padrões (ou modelos) sobre os dados);
- e) Interpretação e avaliação: coleta dos resultados da fase anterior com possíveis interpretações dos padrões / modelos gerados e que podem ser considerados na base de conhecimento.

A FIGURA 14 abaixo retrata a metodologia considerada por Hendrickx, T. et al. (2015):

FIGURA 14 – PASSOS QUE COMPÕEM O PROCESSO KDD (FRAMEWORK).



FONTE: Hendrickx, T. et al. (2015).

Conclui-se então que os seguintes argumentos são premissas para a obtenção de resultados satisfatórios no conhecimento quando a ciência de dados precisa ser utilizada:

- a) Conhecimento do processo;
- b) Correta seleção dos dados significativos para a análise, baseado no conhecimento do processo;
- c) Correto emprego de técnicas de filtros, eliminação de outliers, etc.
- d) Definição das técnicas de redução da quantidade dos dados;
- e) Aplicabilidade dos dados transformados, com técnicas que permitam a correta geração de padrões e dados harmonizados;
- f) Interpretação e avaliação dos dados obtidos para a geração dos algoritmos de inteligência;

No decorrer dos próximos itens, eventuais narrativas relativas ao uso da ciência de dados deverão ser utilizadas para melhor embasamento teórico das aplicações em visualização gráfica de indicadores e simulação de processos, abordadas nos Apêndices desse trabalho.

3.1 VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE INDICADORES

De uma forma resumida, a recente história da facilidade e evolução da obtenção de informações, com a melhoria dos sistemas computacionais e inteligência embarcada, remonta aos primeiros desenvolvimentos ocorridos na década de 1980, onde eram implementações exclusivamente para poucos escritórios de executivos. Na década de 1990, o processamento analítico on-line e eventualmente a inteligência de negócios, trabalharam em conjunto como parceiros para conter o ataque da era da informação, com ênfase em coletar, corrigir, integrar, armazenar e acessar as informações, para garantir a sua precisão, atualidade e utilidade. Após isso e até os dias atuais, a abordagem dos KPIs (Key Performance Indicators) foi largamente utilizada, após ser introduzida por Robert Kaplan e David Norton como um placar de fácil leitura. Os avanços no armazenamento de dados e novos adventos tecnológicos prepararam o terreno para o “novo” interesse em gerenciamento por meio de uso de métricas, não apenas para uso financeiro, e que dominam o cenário atual. FEW, S. (2006).

Segundo Alhamadi, M. (2020), a definição para visualização gráfica seria “uma exibição visual das informações mais importantes necessárias para alcançar um ou mais objetivos, consolidados e organizados em uma única tela para os que as informações possam ser monitoradas rapidamente”.

Na mesma linha, segundo Bach, B. et al. (2022), uma visualização gráfica, ou um painel visual, ou um dashboard (como é mais usualmente conhecido), oferece uma visão selecionada ao qual as pessoas possam visualizar um grande e complexo conjunto de dados de uma forma rápida. Eles combinam representações visuais e outros efeitos gráficos para fornecer camadas de abstração e simplificação para vários pontos de dados relacionados, para que os usuários obtenham uma visão geral das informações mais importantes e/ou relevantes, de maneira eficiente.

Dessa forma, percebe-se que a evolução das técnicas de visualização gráfica convergiu para um cenário de geração de volume e qualidade das informações, de forma rápida e intuitiva. É então coerente a afirmação que determinados padrões na forma de visualização foram criados, no que diz respeito a dados visuais típicos, tais como medições de grandezas físicas, consumos, totalizações, tendências, entre outros.

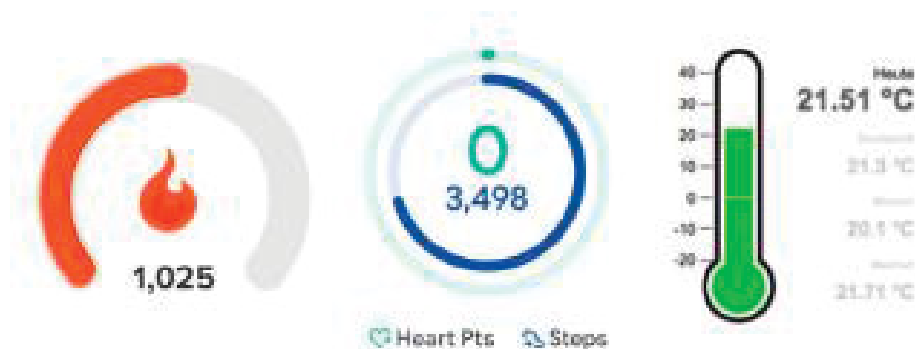
3.1.1 Framework e tendências na construção de dashboards

Segundo Bach, B. et al. (2022), em uma pesquisa realizada em 144 dashboards, inclusive alguns relacionados à Covid-19, em uma variedade de aplicações, tais como saúde e fitness, informações pessoais, transporte, energia, finanças, entre outras, levantando dados estatísticos da utilização de recursos atuais, tais como:

- a) Padrões no uso de dados: Conjunto de dados detalhados: 94%; Agregação: 67%; Filtros: 42%; Valores derivados: 67%; Valores simples: 88%;
- b) Representações visuais: Tabelas: 42%; Listas: 9%; Visualizações detalhadas: 88% Gauges e barras progressivas: 17%; Números: 62%;
- c) Lay-outs de páginas: Abertos: 22%; Estratificados: 49%; Tabela: 19%; Layout agrupado: 33%;
- d) Padrões de cores: Esquema de cores compartilhado: 35%; Codificado: 80%; Semânticos: 26%; Emotivos: 6%;
- e) Padrões de interação: Exploração: 89%; DrillDown: 55%; Navegação: 76%; Personalizado: 23%;
- f) Padrões de gênero: Estático: 21%; Analítico: 73%; Repositório: 17%; Miniatura: 4%; Revista: 2%; Infográfico: 6%;

A FIGURA 15 a seguir traz um framework de utilização de gauges, barras dinâmicas e visualizações de números em um dashboard: BACH, B. et al. (2022).

FIGURA 15 –VISUALIZAÇÃO DE DADOS EM DASHBOARDS (FRAMEWORK)



FONTE: Bach, B. et al. (2022).

Observar que, no exemplo acima, há uma correlação entre as aplicações e as cores utilizadas para o entendimento e visualização imediata das informações, associando cores quentes (no caso da indicação, a esquerda), com a importância da informação, e no lado direito, com a indicação de temperatura (no caso em verde), com a visualização que corresponde à uma variável em estado normal.

A FIGURA 16 a seguir traz frameworks de utilização gráfica de tabelas, lista de dados e lista de textos em um dashboard: BACH, B. et al. (2022).

FIGURA 16 –TABELAS, LISTA DE DADOS E TEXTOS EM DASHBOARDS (FRAMEWORK).



FONTE: Bach, B. et al. (2022).

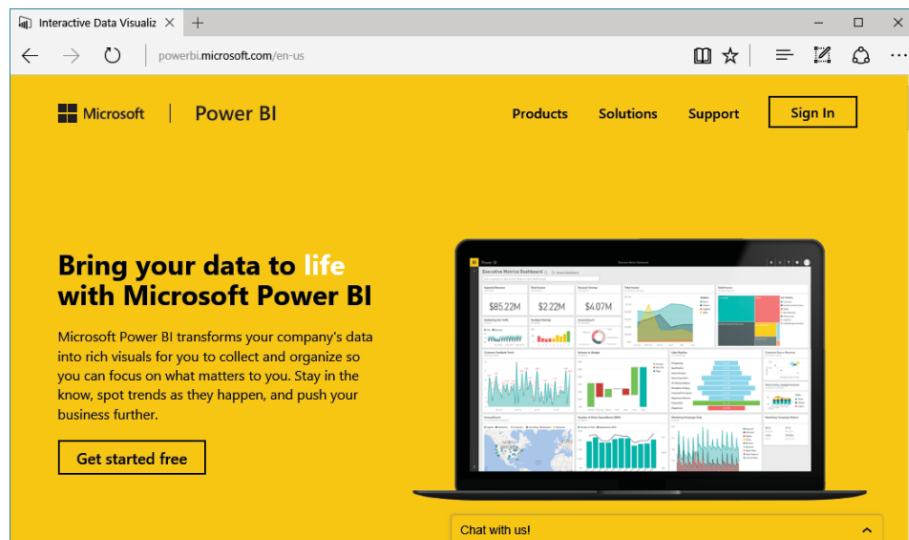
No exemplo acima, no lado esquerdo, existem indicações em verde e em amarelo com símbolo de exclamação, com uma fácil interpretação do usuário que os dados em verde estão compatíveis e dentro das expectativas, e os indicados em amarelo, requerem atenção. Dessa forma, é coerente a afirmação que a construção de dashboards depende da aplicação, do público-alvo, da complexidade e usabilidade das informações, entre outros, onde certamente o processo de concepção dessa ferramenta dependerá dessa análise para a correta interpretação das informações geradas.

3.1.2 O uso do Power BI® para a criação de dashboards

O Power BI® é uma evolução de recursos adicionais que foram disponibilizados primeiramente no Excel®, como o Power Pivot, Power Query e Power View. O Power BI® é uma ferramenta que pode rodar como aplicação dentro de um computador pessoal, ou pode funcionar como serviço, rodando na nuvem. Essa possibilidade de rodar na nuvem pode inclusive ser disparada mesmo com o uso da versão Desktop, criando uma aplicação para publicação. Como condição, o usuário

precisa ter uma subscrição para o Office 365® para ganhar acesso ao Power BI®. A tela de download do Power BI® pode ser acessada pelo weblink <https://www.powerbi.com>, ou powerbi.microsoft.com/en-us (para versão em inglês), ou powerbi.microsoft.com/pt-br (se desejar rodar conversão em português) para a versão Desktop: FERRARI, A.; RUSSO, M. (2016). Vide FIGURA 17 a seguir:

FIGURA 17 – TELA DE BOAS-VINDAS DO POWER BI DESKTOP.



FONTE: Ferrari, A.; Russo, M. (2016).

Segundo Pawlowski, L. et al. (2020), o Power BI® é um ecossistema que inclui uma coleção de serviços de software, aplicações e conexões que facilitam a criação de relatórios e dashboards, além de uma análise visual de informações. Esse ecossistema é composto pelo QUADRO 1, abaixo:

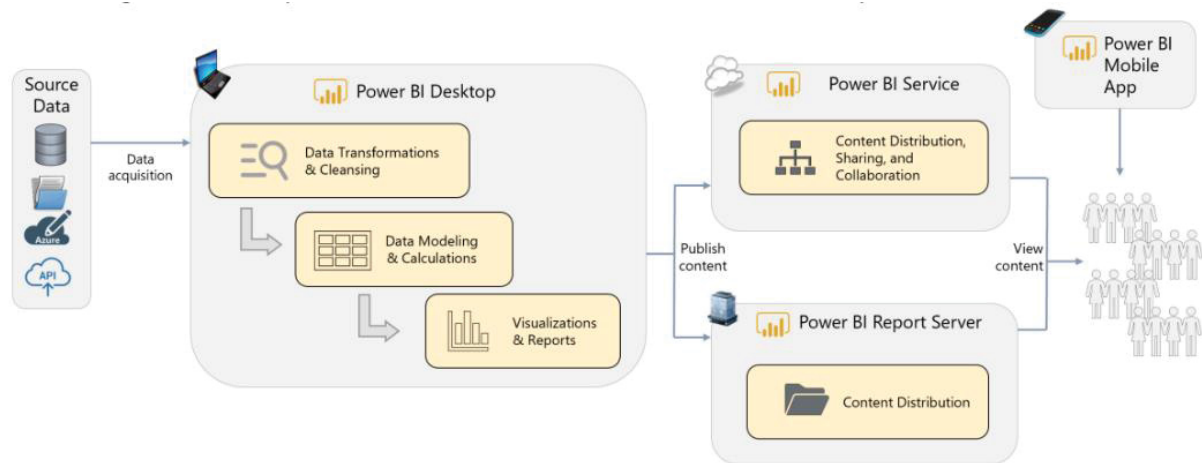
QUADRO 1 – LISTA DE FERRAMENTAS DO POWER BI®.

Texto	Texto
Power BI® Desktop	Ferramenta de criação baseada em desktop para conectar, transformar e modelar dados para criar relatórios e dashboards interativos
Power BI® Service	Serviço baseado em nuvem que dá suporte à colaboração, compartilhamento, distribuição corporativa, criação de painéis, entre outros
Power BI® App Workspace	Ferramenta de colaboração do Power BI® Workspace dentro do Power BI® Service
Power BI® App	Pacote que roda dentro do Power BI® Service
Power BI® Mobile Apps	Ferramenta nativa para iOS®, Android® e Windows® para exibição de relatórios e dashboards
Power BI® Report Server	Alternativa ao serviço do Power BI® Service para publicação de relatórios ou dashboards em um datacenter local

FONTE: Pawlowski, L; et al. (2020).

Além disso, existe o Power BI® Premium, que é uma licença com recursos dedicados para relatórios, dashboards, e conjunto de dados com o Power BI® Service. A FIGURA 10 abaixo demonstra uma arquitetura típica de fontes de dados, Power BI® Desktop, Power BI® Service, Power BI® Report Server, e Power BI® Mobile. PAWLOWSKI, L; et al. (2020).

FIGURA 18 – FUNCIONALIDADES MAIS COMUNS DO POWER BI®.



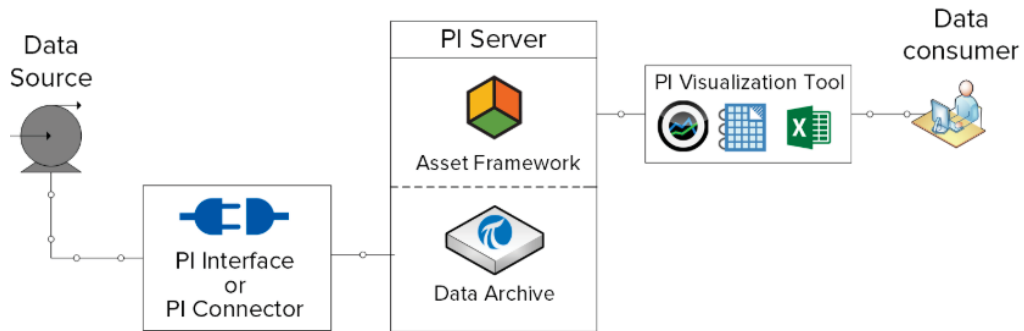
FONTE: Pawlowski, L; et al. (2020).

O uso do Power BI® para a criação de dashboards deverá ser aplicado neste Projeto, pela sua praticidade na conexão com os dados, pela disponibilidade e facilidade de governança pelos times locais da MP-16, onde será explorado em mais detalhes no capítulo do Desenvolvimento.

3.1.3 O uso do PI Vision® para a criação de dashboards

Para contextualizar a aplicação do PI Vision®, é importante entender o funcionamento do pacote PI System®: O PI System® é um produto da empresa Aveva®, que em 2021 comprou a empresa OsiSoft®, a detentora e criadora dessa ferramenta. O PI System® é basicamente um pacote de software que coleta, armazena e aprimora os dados de processo de planta industrial ou simplesmente uma parte do processo, e os entrega aos usuários que precisam dessas informações. Simplificando, o PI System® é tudo entre a fonte de dados e o consumidor de dados. A FIGURA 19 mostra uma visão simplificada do PI System®:

FIGURA 19 – VISÃO SIMPLIFICADA DO PI SYSTEM®.

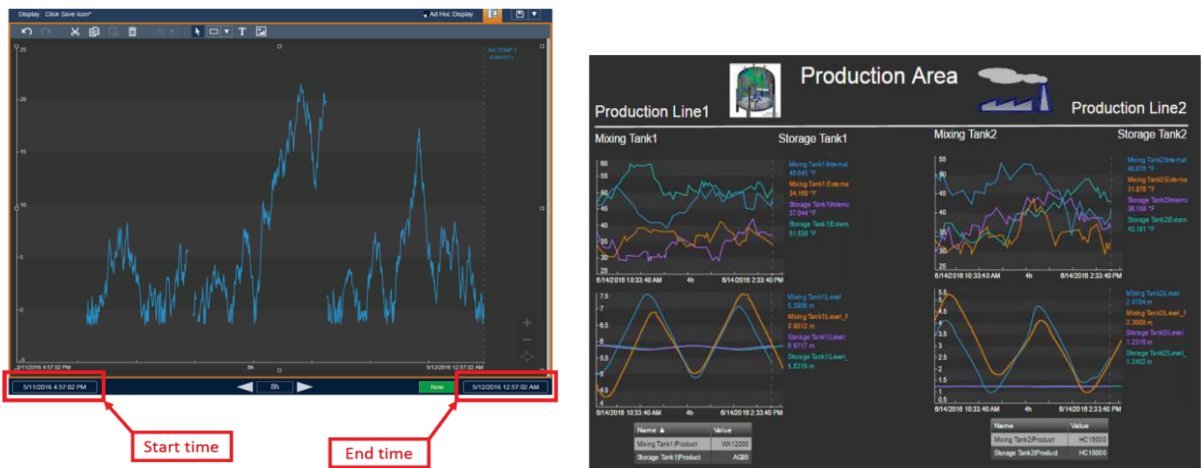


FONTE: Aveva (2022).

Em uma arquitetura simplificada, temos o “Data Source”, ou a fonte de dados, que é a origem da informação (uma indicação de corrente de motor, uma temperatura de um tanque, como exemplo), o “PI Interface” ou “PI Conector”, que coleta os dados da origem, o “PI Server”, composto pelo “Data Archive”, que armazena os dados, o “Asset Framework”, que organiza e aprimora os dados, e o “PI Visualization Tool”, que exhibe os dados para os usuários finais. AVEVA (2022).

Ainda segundo Aveva (2022), uma das ferramentas de visualização do PI (“PI Visualization Tools”) é o PI Vision®, que é uma ferramenta que permite aos usuários acessar os dados do PI System por meio de um navegador Web e ao mesmo tempo desenvolver e criar exibições ad-hoc para visualização dos dados, conforme exemplo da FIGURA 20 abaixo:

FIGURA 20 – EXEMPLOS DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS NO PI VISION®.



FONTE: Aveva (2022).

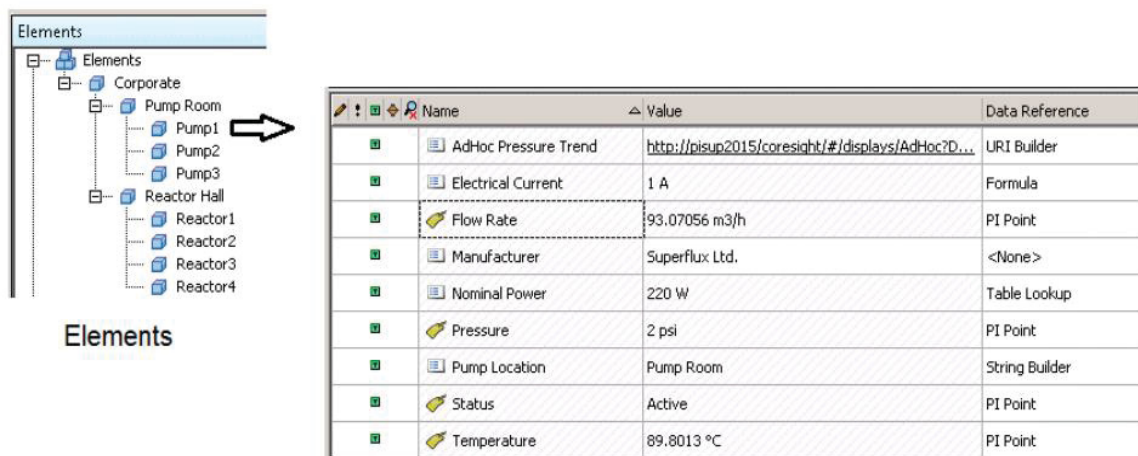
O uso do PI Asset Framework® (ou simplesmente PI-AF®) e o PI Asset Analytics® são a base para a criação dos modelos matemáticos para a geração de informações (vide Apêndice 1 para a melhor compreensão desses modelos) que podem ser consumidas no PI Vision®.

Segundo Osisoft (2022), o PI Asset Framework® (PI AF®) é um repositório único para modelos, hierarquias, objetos e equipamentos baseados em ativos. Ele integra, contextualiza, refina, referência e analisa detalhadamente dados de várias fontes, incluindo um ou mais PI Data Archives e fontes diferentes do PI, como bancos de dados relacionais externos.

No PI-AF®, os equipamentos e os processos a serem monitorados são chamados “ativos”. Um ativo representa um componente físico ou lógico de um processo. Os ativos são configurados no PI-AF® como “elementos”, e a representação do PI-AF® de todos os ativos e processos em um conjunto é denominada “modelo de ativo”, que é uma estrutura hierárquica, e pode representar um modelo digital do processo em questão.

Um atributo representa uma propriedade que é exclusiva, e que está associada a um ativo. Os atributos podem manter valores simples que representam informações fixas, como o fabricante de uma bomba. Eles também podem fazer referência a uma tag do PI, uma fórmula, um valor de um banco de dados relacional ou a uma tabela interna do PI-AF®, entre outros.

FIGURA 21 – ORGANIZAÇÃO DOS ELEMENTOS E ATRIBUTOS NO PI AF®.



Name	Value	Data Reference
AdHoc Pressure Trend	http://pisup2015/coresight/#/displays/AdHoc?D...	URI Builder
Electrical Current	1 A	Formula
Flow Rate	93.07056 m3/h	PI Point
Manufacturer	Superflux Ltd.	<None>
Nominal Power	220 W	Table Lookup
Pressure	2 psi	PI Point
Pump Location	Pump Room	String Builder
Status	Active	PI Point
Temperature	89.8013 °C	PI Point

Attributes for Pump1

FONTE: Osisoft (2022).

A FIGURA 21 acima demonstra a organização do PI-AF®, associando um ativo à um elemento (que pode ser uma área de processo, um tanque, uma bomba), que por sua vez possui atributos (que são efetivamente os dados de processo).

Ainda segundo Osisoft (2022), O PI Asset Analytics® é usado para criar e gerenciar as análises, que leem os valores das informações coletadas (ou atributos) do PI-AF®, efetuam os cálculos necessários ao processo e gravam os resultados em outros atributos que podem ser lidos pelo PI Vision®. Vide FIGURA 22 abaixo.

FIGURA 22 – ORGANIZAÇÃO DAS ANÁLISES NO PI ANALYTICS®.

The screenshot displays the 'Analysis Demo' window in PI Analytics. It features a tabbed interface with 'Analyses' selected. A table lists three analyses: 'Sum', 'Sum2', and 'Anal...'. To the right, configuration fields for 'Analysis1' are visible, including 'Name', 'Description', 'Categories', and 'Analysis Type' (set to 'Expression'). Below, a table shows the results of four variables, including their expressions, current and last triggered values, and output attributes.

Name	Expression	Value at Evaluatio	Value at Last Trigg	Output Attribute
Variable1	TagAvg('SensorX', '*-10m', '**')	67.06	67.228	Map
Variable2	TagTot('SensorY ', '*-24h', '**', 80)	50.08	50.08	Map
Variable3	TimeEQ('Mode', 't-4d', 't', "Manual")	26663 s	26663 s	Map
Variable4	If 'SensorX' >= 90 then "Overload" els	Normal	Normal	Map

FONTE: Osisoft (2022).

A biblioteca AF SDK® associada ao PI System® é uma biblioteca NET que provém estrutura para acessar uma variedade de dados armazenados no PI System®. O AF SDK® permite ao usuário construir aplicações com dados de um ou mais PI Systems, bem como com sistemas externos, o que permite a união e extração de dados e disponibilização por escrita ou leitura, com front-ends, por exemplo. PI_AF_SDK (2022).

Segundo Klabin-Osisoft (2021), a ferramenta é capaz de realizar, através da configuração dos elementos, atributos, análises, no PI-AF®, a função Digital Twin, mais especificamente na realização de simulação de processos, criando um modelo digital em tempo real para a produção de celulose da planta Puma/PR (vide FIGURA

23), desde a colheita até a secadora, identificando problemas no processo relativos à qualidade através do cálculo de tempos de retenção do produto (celulose), em seus diferentes estágios, permitindo à Operação e Gestão de produção da celulose o acompanhamento e mitigação de problemas.

FIGURA 23 – MODELO DIGITAL UTILIZANDO O PI-AF® DA AVEVA®.



KLABIN: PAPER GETS A DIGITAL TWIN

Klabin, founded in 1899, is Brazil's largest producer and exporter of paper products and pulp. The company operates 17 plants in Brazil and Argentina and produces 3.5 million tons of pulp per year.

The Puma plant represents the largest investment in Klabin's 120 year history and the largest private investment to date in the Brazilian state of Paraná. The plant churns out 1.5 million tons of pulp per year and is energy self-sufficient, producing 270MW of its own energy per day, enough power for a city of one million people. OSIsoft's PI System software gave Klabin the power to create a real-time digital model of pulp production at Puma, from tree harvesting all the way through drying. As a result, Klabin can make faster, better decisions, automate notifications of abnormal production conditions, and trace products through the entire production process.

FONTE: Klabin-Osisoft (2021).

O PI Datalink® é uma ferramenta associada ao PI System® e funciona como plug-in no Excel®, permitindo ao usuário a busca de informações no Data Archive. Essa ferramenta realiza a captura dos dados, sejam eles dados on-line, históricos, calculados (no próprio Data archive), e realiza cálculos usando a capacidade do próprio Excel®. A FIGURA 24 abaixo mostra um exemplo de coleta de informações e processamento que o PI Datalink® consegue realizar:

FIGURA 24 – EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PI DATALINK®.

N6																
fx (=PICompFiltDat(Tabelle5!\$B\$1;Tabelle5!\$B\$2;Tabelle5!\$B\$3;Tabelle5!\$N\$2;0,1,"", "inside"))																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Data item	sinusoid		Filter 1:			Filter 2:			Filter 3:				Filter 4:		
2	Start	-24h		if TagVal("sinusoid","")>15 then 1 else 0			if TagVal("sinusoid","")>15 then 0 else 1			if TagVal("sinusoid","")>15 then 0 else 99				if TagVal("sinusoid","")>15 then 1 else 2		
3	End	*														
4																
5																
6	Anzahl Werte:	17		Anzahl Werte:	10		Anzahl Werte:	7		Anzahl Werte:	7			Anzahl Werte:	17	
7	20-07-2017 10:57:42	24,135767		20-07-2017 10:57:42	24,135767		20-07-2017 19:33:12	13,671575		20-07-2017 19:33:12	13,671575			20-07-2017 10:57:42	24,135767	
8	20-07-2017 13:31:12	85,723419		20-07-2017 13:31:12	85,723419		20-07-2017 20:36:42	1,0301251		20-07-2017 20:36:42	1,0301251			20-07-2017 13:31:12	85,723419	
9	20-07-2017 14:31:12	98,429077		20-07-2017 14:31:12	98,429077		20-07-2017 21:35:42	2,4067354		20-07-2017 21:35:42	2,4067354			20-07-2017 14:31:12	98,429077	
10	20-07-2017 15:31:12	98,158226		20-07-2017 15:31:12	98,158226		21-07-2017 07:31:12	14,276486		21-07-2017 07:31:12	14,276486			20-07-2017 15:31:12	98,158226	
11	20-07-2017 16:40:42	81,905098		20-07-2017 16:40:42	81,905098		21-07-2017 08:31:12	1,5708904		21-07-2017 08:31:12	1,5708904			20-07-2017 16:40:42	81,905098	
12	20-07-2017 19:33:12	13,671575		20-07-2017 22:47:12	20,328636		21-07-2017 09:31:12	1,841813		21-07-2017 09:31:12	1,841813			20-07-2017 19:33:12	13,671575	
13	20-07-2017 20:36:42	1,0301251		21-07-2017 01:33:12	86,328712		21-07-2017 09:45:42	3,9236817		21-07-2017 09:45:42	3,9236817			20-07-2017 20:36:42	1,0301251	
14	20-07-2017 21:35:42	2,4067354		21-07-2017 02:39:12	99,178566									20-07-2017 21:35:42	2,4067354	
15	20-07-2017 22:47:12	20,328636		21-07-2017 03:44:12	96,326462									20-07-2017 22:47:12	20,328636	
16	21-07-2017 01:33:12	86,328712		21-07-2017 04:57:42	75,864113									21-07-2017 01:33:12	86,328712	
17	21-07-2017 02:39:12	99,178566												21-07-2017 02:39:12	99,178566	
18	21-07-2017 03:44:12	96,326462												21-07-2017 03:44:12	96,326462	
19	21-07-2017 04:57:42	75,864113												21-07-2017 04:57:42	75,864113	
20	21-07-2017 07:31:12	14,276486												21-07-2017 07:31:12	14,276486	
21	21-07-2017 08:31:12	1,5708904												21-07-2017 08:31:12	1,5708904	
22	21-07-2017 09:31:12	1,841813												21-07-2017 09:31:12	1,841813	
23	21-07-2017 09:45:42	3,9236817												21-07-2017 09:45:42	3,9236817	
24																

FONTE: PI_Datalink (2022).

O PI Builder®, que semelhantemente ao PI Datalink® é associado ao uso do Excel®, consegue relacionar dados diretamente da base de dados do PI-AF®, com funções de busca dos elementos, atributos, entre outros, desde que devidamente conectado à base de dados de origem das informações, conforme funcionalidades expressas na ferramenta pela FIGURA 25 abaixo:

FIGURA 25 – EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PI BUILDER®.



FONTE: O Autor (2022).

Adicionalmente, o uso do PI Vision® para a criação de dashboards, do PI-AF® para a criação dos elementos e atributos com as respectivas análises, pode gerar os modelos matemáticos necessários que deverão ser aplicados neste Projeto, pela sua praticidade na conexão com os dados, pela disponibilidade e facilidade de governança pelos times locais da MP-16, onde serão explorados em mais detalhes no capítulo do Desenvolvimento.

3.1.4 O uso do Python® para a criação da interface de Simulação de Cenários

O Surgimento do Python ocorreu em 1991, e se tornou uma das linguagens interpretadas mais populares, juntamente com Perl, Ruby e outros. Python e Ruby se tornaram especialmente populares por volta de 2005 para a construção de sites, com seus diversos frameworks web como Rails (Ruby) e Django (Python). Essas linguagens são chamadas de “Scripting”, pois podem ser usadas para escrever rapidamente pequenos programas ou scripts para automatizar tarefas.

Nos últimos anos, o Python passou de uma linguagem de computação científica inovadora, para uma das mais importantes na utilização em aprendizado de máquina (Machine Learning), ciência de dados e desenvolvimento de softwares em geral. MCKINNEY, W. (2018).

O Python, assim como outras linguagens tradicionais de programação, trabalha com bibliotecas. Além das bibliotecas tradicionais, podem-se destacar algumas delas, conforme o QUADRO 2 abaixo:

QUADRO 2 – EXEMPLOS DE BIBLIOTECAS PADRÕES DO PYTHON®

Texto	Texto
NumPy (http://numpy.org/)	Código aglutinador para estrutura de dados
Pandas (http://pandas.pydata.org/)	Oferece estruturas de dados de alto nível e funções para trabalhos com dados
Matplotlib (http://matplotlib.org/)	Biblioteca Python mais popular para fazer plotagens e gerar outras visualizações de dados bidimensionais
SciPy (http://scipy.org/)	Coleção de pacotes voltada para uma série de diversos domínio de problemas padrões no processamento científico
Scikit-learn (http://sci-kit-learn.org/stable/)	Kit de ferramentas de propósito geral para aprendizado de máquina (ML)
Statsmodels (http://statsmodels.org/)	Pacote de análise estatística que nasceu na Universidade de Stanford, pelo professor Jonathan Taylor

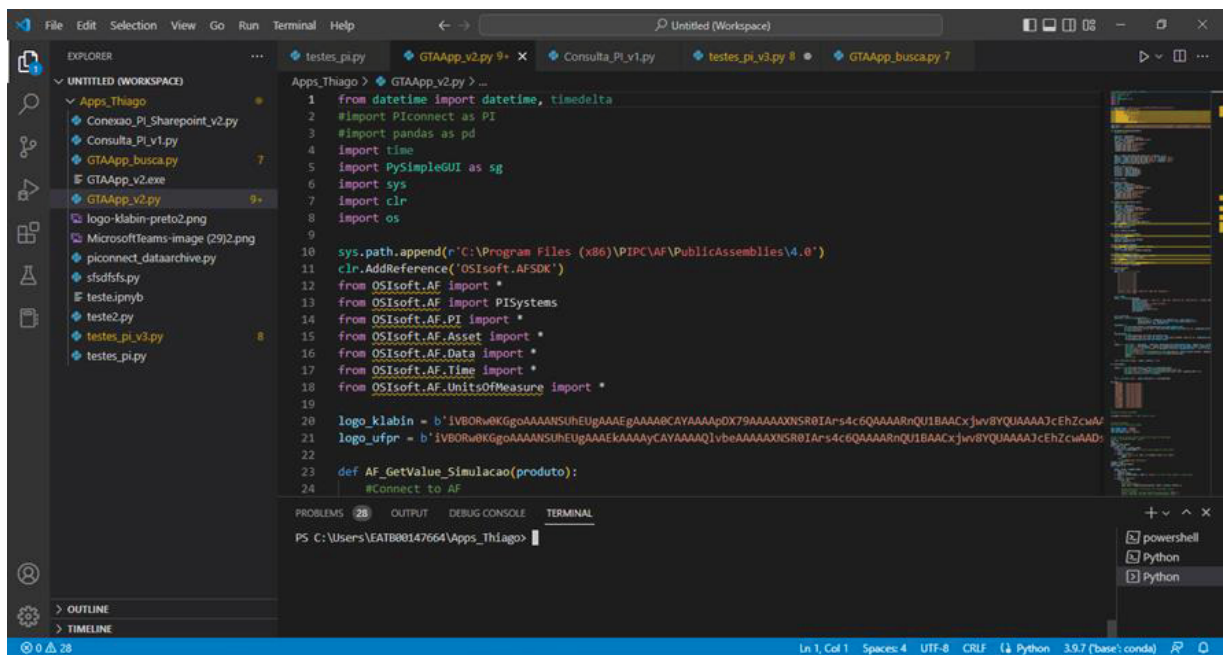
FONTE: Mckinney, W. (2018).

Além das bibliotecas acima, as mais comuns, existem outras desenvolvidas para aplicações específicas, dentre elas: PySimpleGUI, que é um pacote de interface gráfica PYTHON_GUI (2022), PythonNet, responsável pela integração com aplicações .NET PYTHON_NET (2022) e o Pyinstaller, usado para compilação do código fonte PYTHON_GUI (2022).

Como ferramenta de edição de códigos fontes de linguagens de computação científica, o Visual Studio Code, ou VS Code, é um editor de códigos de fonte livre para desenvolvimento e depuração de erros que pode rodar diferentes linguagens de bases de dados, tais como C++, Javascript, Json, XML e Python. KAHLERT, T.; GIZA, K. (2016).

A FIGURA 26 abaixo demonstra a forma de configuração do VS Code utilizando como fonte de linguagem de dados do Python:

FIGURA 26 –CONFIGURAÇÃO EM PYTHON® COM O VS CODE

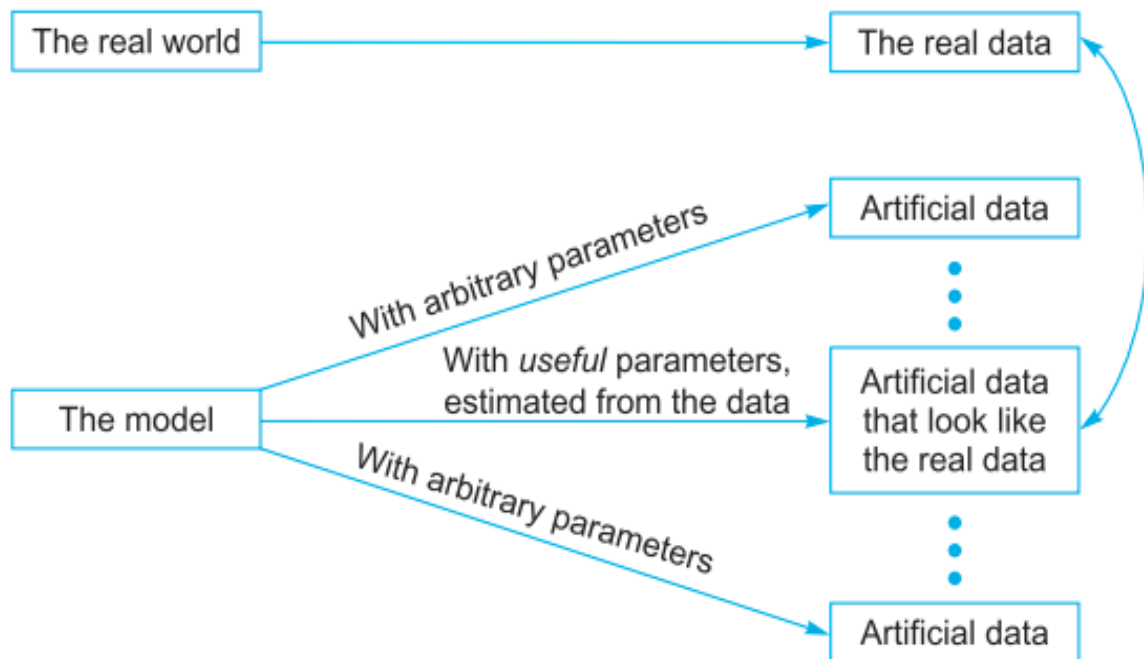


FONTE: O Autor (2022).

3.2 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

Entende-se que a base de conhecimento para a criação de um modelo de simulação de processos, seja um modelo matemático ou físico, produzam dados artificialmente similares ao mundo real. Um modelo é um sistema de premissas e equações que podem gerar dados de forma artificial. Quando se escolhe os parâmetros desse modelo, os dados artificiais podem ser similares aos dados reais, e estes parâmetros podem ajudar a entender a situação real. A FIGURA 27 demostra a relação entre o Modelo e o Mundo real. SIEGEL, A. F., (2016).

FIGURA 27 – MUNDO REAL VERSUS MODELO.



FONTE: Siegel, A. F., (2016).

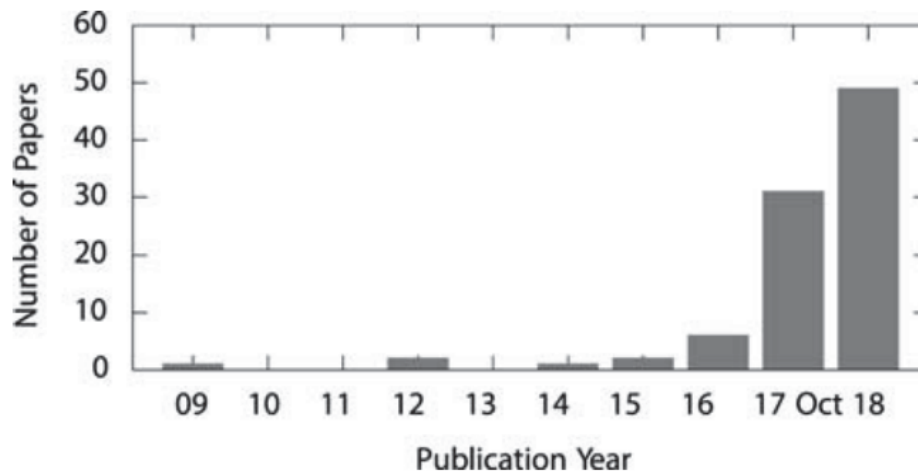
Paralelamente, a definição do Digital Twin (ou o gêmeo digital), aplicado ao cenário de processos industriais, possui grande afinidade com a definição da simulação de processos, conforme será ilustrado.

Segundo Tao, Fei. et al. (2019), a indústria e academia definem o conceito de Digital Twin de formas diferentes, e o conceito geralmente aceito é que se trata de uma simulação “ultra realística, probabilística, multi física e multi escala, integrada de sistemas ou produtos, que podem espelhar a vida ou seus gêmeos correspondentes usando modelos físicos disponíveis, dados históricos, dados em tempos real, etc.”.

O termo “Digita Twin” foi utilizado pela primeira vez em um curso ministrado pelo acadêmico Michael Grieves em 2003 (Product Lifecycle Management- PLM), sendo definido como “um conjunto de modelos virtuais combinados, podendo representar produtos oriundos da manufatura físicos, reais ou potenciais, em uma visão micro ou macro do processo”, tendo incluído na ocasião os seus principais elementos: espaço real, espaço virtual e a interação de informações entre espaço virtual e real. KRITZINGER, W. et al. (2018).

O interesse no tema Digital Twin teve um grande aumento de 2014 até 2018 na academia e na indústria, acompanhado por um crescimento no número de publicações. JONES D. et al. (2018).

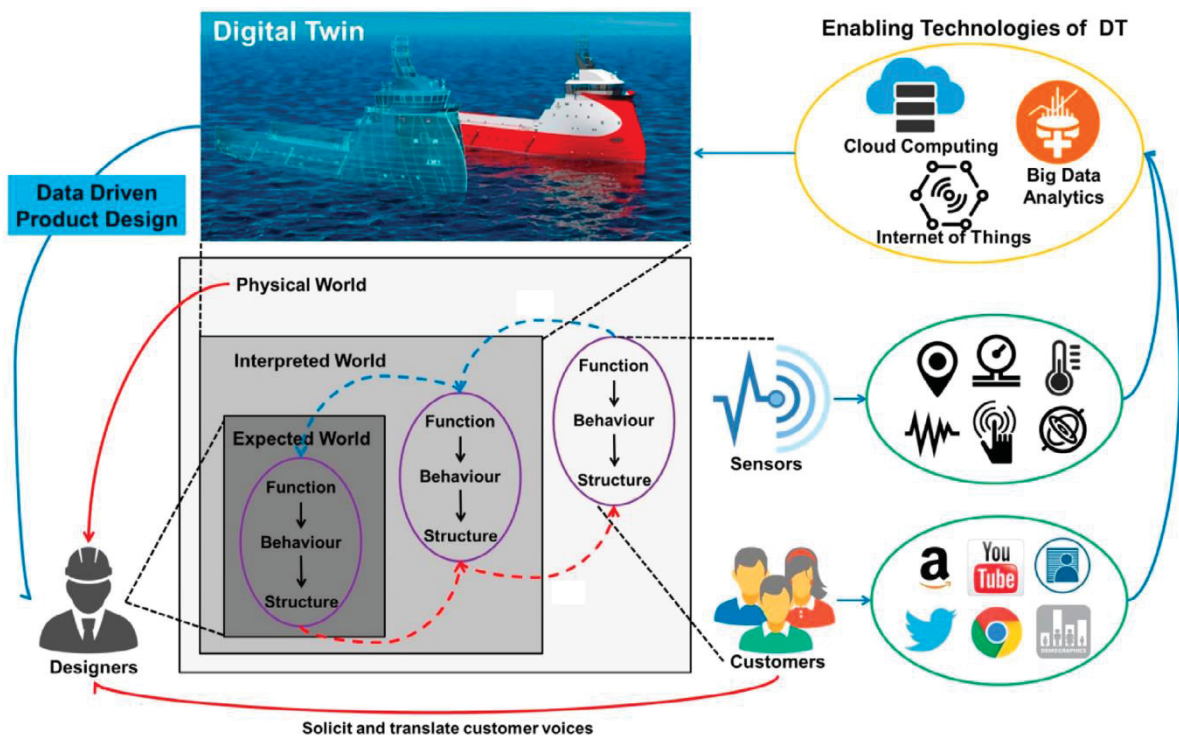
GRÁFICO 1 – PUBLICAÇÕES COM O TEMA DIGITAL TWIN (2009 -2018)



FONTE: Jones, D. et al (2018).

Tao, Fei et al. (2019) propõe um modelo de Digital Twin com três dimensões: mundo físico, mundo interpretado, e mundo esperado, conforme FIGURA 28 abaixo:

FIGURA 28 – FRAMEWORK DE MODELO DE DIGITAL TWIN.



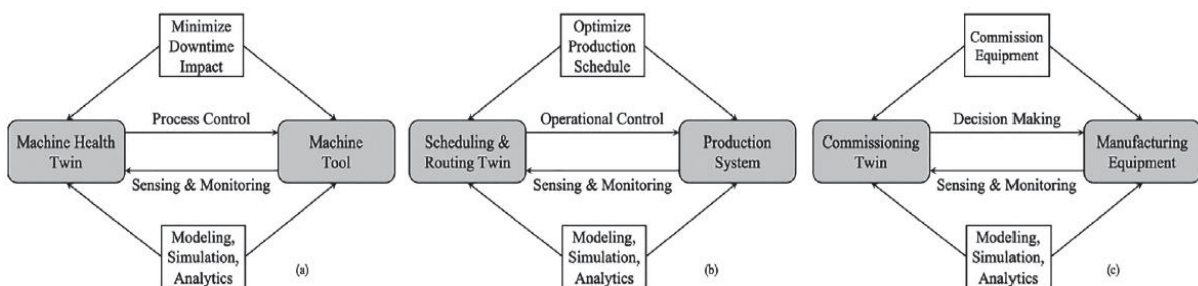
FONTE: Tao, Fei et al. (2019).

Nessa vertente, as fundações do Digital Twin incluem a modelagem, simulação, verificação, validação e acreditação, bem como a fusão de dados, interação e colaboração, e os serviços. PSAROMMATIS, F. (2021).

Segundo Shao, G.; Helu, M. (2020), a norma ISO 23.247 (Automation Systems and Integration - Digital Twin Framework for Manufacturing), ainda em desenvolvimento, é uma proposta de modelagem não direcionada (genérica) para a Engenharia da Manufatura, com 4 layers: o sistema de observação da manufatura, o sistema de coleta de dados e controle da entidade, o modelo Digital Twin e a interface do usuário.

O Digital Twin é um conceito que está em um processo contínuo de aprimoramento e desenvolvimento com o passar dos anos, e tem sido amplamente utilizado na área industrial, com comprovados resultados em potencial, sendo uma tecnologia que usa o modelo virtual digitalizado para refletir e copiar o comportamento da funcionalidade do modelo físico em ambiente real, expandindo assim novos cenários de modelos físicos por meio da interação dos dados, compartilhamento e fusão das informações, otimização interativa, entre outras vantagens. YU, H. et al. (2021) A FIGURA 29 abaixo traz alguns exemplos do uso do Digital Twin na Manufatura:

FIGURA 29 – EXEMPLOS DO USO DO DIGITAL TWIN NA MANUFATURA.



FONTE: Shao, G.; Helu, M. (2020).

Ainda segundo Shao, G; Helu M. (2020), existem 3 (três) tipos de uso do Digital Twin na manufatura:

- a) Minimização do impacto da indisponibilidade de equipamentos: nesta filosofia, o Digital Twin pode usar o processo e os dados do equipamento para monitorar, diagnosticar, monitorar problemas e principalmente

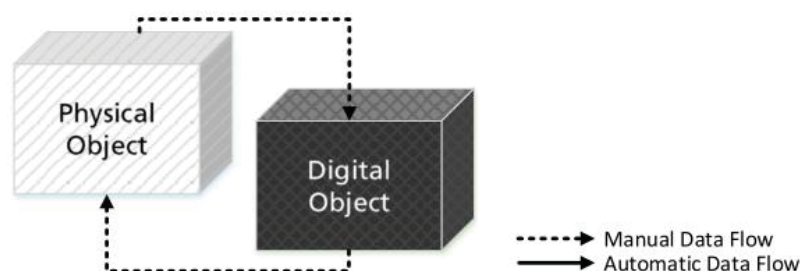
prever falhas, aumentando a disponibilidade e conseqüentemente a qualidade.

- b) Planejamento e programação da otimização da produção: o Digital Twin pode coletar dados do chão de fábrica, como equipamentos de produção, sistema MES (Manufacturing Enterprise System), analisando a situação atual da produção e algumas flutuações de demandas de clientes, recursos ou inventários.
- c) Comissionamento Virtual: O Digital Twin pode usar informações coletando dados para monitorar a performance de novos equipamentos durante a fase de comissionamento de sistemas, com constante otimização das informações e características de funcionamento dos equipamentos a serem comissionados.

As pesquisas sobre Digital Twin oriundas da indústria ou de Universidades não possuem um alinhamento claro na sua definição ou característica, com diferentes definições, entretanto, existem diferenças claras desse entendimento, onde Kritzinger, W. et al. (2018) propõe uma categorização baseada no seu nível de integração pelo ponto de vista de troca de informações entre o mundo real e virtual (ou modelo), nominalmente pelos conceitos de Digital Models (DMs), Digital Shadows (DS) e Digital Twin (DTs), diferenciando-os pelo fluxo de dados, conforme abaixo:

- a) Digital Model: É uma representação de um objeto físico planejado que não usa qualquer forma de troca de dados automática entre o objeto físico e o objeto digital;

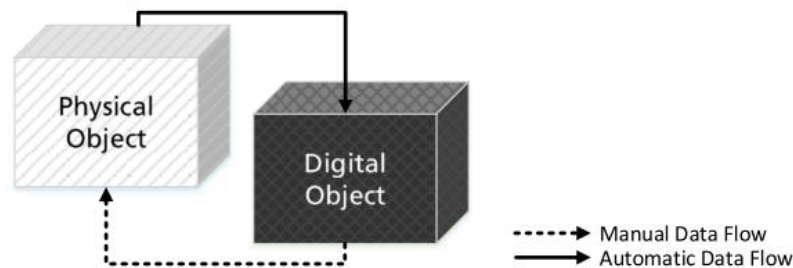
FIGURA 30 – FLUXO DE DADOS NO DIGITAL MODEL (DM).



FONTE: Kritzinger, W. et al (2018).

- b) Digital Shadow: Qualquer mudança de estado no objeto físico direciona para uma mudança no objeto digital, mas não vice-versa.

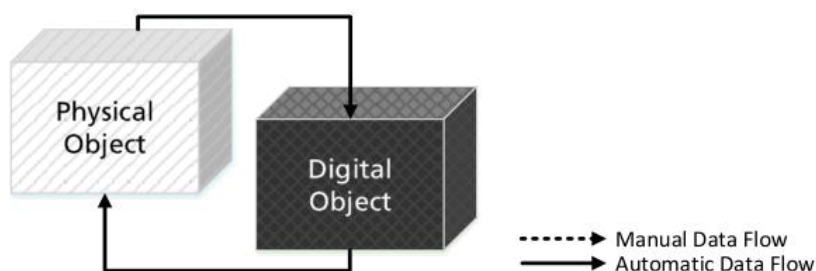
FIGURA 31 – FLUXO DE DADOS NO DIGITAL SHADOW (DS).



FONTE: Kritzinger, W. et al (2018).

- c) Digital Twin: Qualquer mudança de estado no objeto físico direciona para uma mudança no objeto digital e vice-versa.

FIGURA 32 – FLUXO DE DADOS NO DIGITAL TWIN (DT).



FONTE: Kritzinger, W. et al (2018).

Adicionalmente, ainda segundo Kritzinger, W. et al. (2018), apesar da maioria dos artigos acadêmicos usar o termo Digital Twin, apenas 18% deles são realmente descritos como um Digital Twin, com uma transferência de dados bidirecional, e aproximadamente 35% foram descritos como Digital Shadows, e 28% como Digital Models.

Percebe-se assim que existem diferentes tipos de conceitos por diferentes linhas de pesquisa e diferentes aplicações para a tecnologia Digital Twin, e somente no campo da Engenharia da Manufatura, existem exemplos de aplicações para mitigar problemas de indisponibilidade de equipamentos, ajudando a criação de índices OEE (Overall Equipment Effectiveness), no planejamento e programação da otimização da produção, ajudando a criação de índices KPI (Key Performance Indicators),

estabelecendo também rotinas para recursos de entrega imediata, redução da otimização de inventários, entre outros. Para o comissionamento virtual, permite aos donos dos equipamentos nesta fase dos Projetos descobrirem e resolverem problemas antes de investir e evitar a necessidade de ajustes de custos durante ou depois da instalação. Nos exemplos citados, podem ser utilizados recursos de Sistemas Cyber-Físicos (CPS).

3.2.1 Aplicação da Tecnologia Digital Twin em Sistemas Cyber Físicos

Os Sistemas Cyber Físicos (CPSs) são uma nova tendência na manufatura inteligente, onde o sistema físico atua como um centralizador de acesso aos dados, com sensores e sistemas de comunicação coletando informações do chamado “mundo real”, e realiza a transferência para módulos computacionais, que irão analisar e notificar os desvios para os sistemas físicos correspondentes através de múltiplos loops de feedback. O CPS é um mecanismo de integração mútua, mapeamento e inversão entre componentes físicos, componentes de software e em vários modelos no espaço virtual.

Através das redes, objetos físicos, software de processos, dados e informações no espaço virtual podem ser bem controlados e monitorados. Pela evolução das tecnologias para o desenvolvimento do gerenciamento e previsão da saúde de equipamentos, e especialmente com o rápido avanço do ICT (Information and Communication Technologies), proporcionou a facilitação da implementação de sensores de última geração, equipamentos de coleta de dados, comunicação wireless e soluções de computação remota. Estas tecnologias, com o avanço na analítica preditiva, estão transformando os ambientes industriais, deixando-as mais modernas. CHEN, G. et al. (2020).

Segundo Lee, J. et al. (2015), A integração de analítica avançada com tecnologias de comunicação em aproximação conjunta com as máquinas em campo, são conhecidos também como Sistemas Cyber Físicos.

Segundo Yu, H. et al. (2021), a proposta para um framework em Digital Twin para CPS, é feita em cinco partes principais:

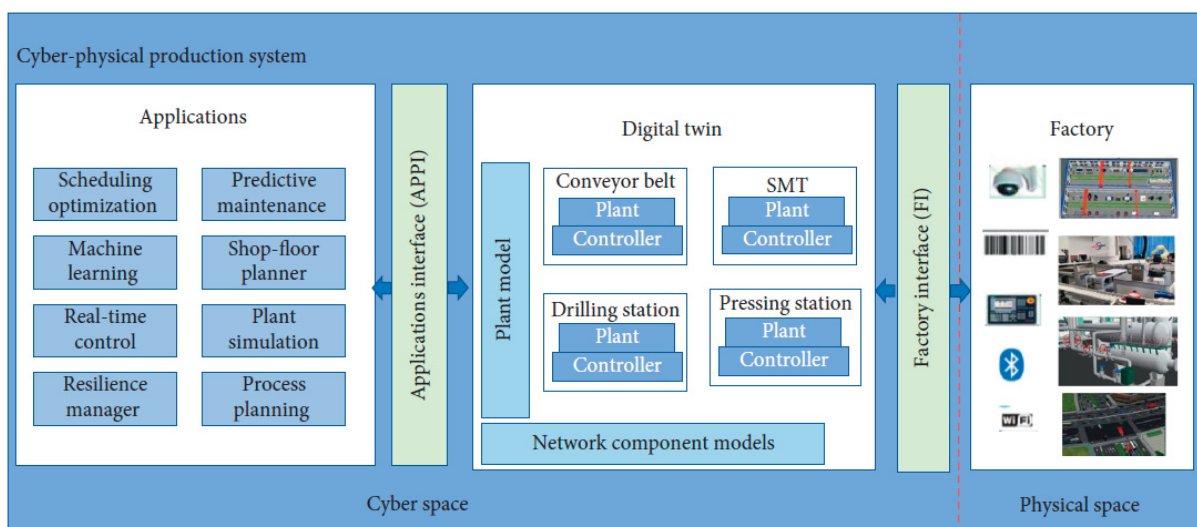
- a) A Fábrica (Factory): O ambiente fabril deve estar conectado com a internet para coleta de dados relevantes. A informação de equipamentos, a

informação de manuseio de materiais e informações do armazém podem ser transmitidas para o ambiente “gêmeo” fabril. O sistema necessita interagir com o ambiente fabril real.

- b) A Tecnologia Digital Twin: Nessa sugestão de um ambiente de manutenção com alguns tipos de equipamentos, promovendo a minimização do impacto da indisponibilidade, o ponto ótimo para a realização da manutenção pode ser previsto através da coleta e análise contínua e análise inteligente dos dados de operação.
- c) A Interface da Fábrica (Factory Interface): É responsável por extrair os dados dos sensores, atuadores e demais equipamentos do espaço físico.
- d) A Interface do Programa de Aplicação (Application Interface): Disponibiliza o Application Program Interface (API) para os modelos, ou “desejos de aplicação”, para extrair a vantagem da tecnologia Digital Twin.
- e) As Aplicações (Applications): Coordena e comanda alocações de recursos, Machine Learning, simulações, planos e programas de processos, e periodicamente gera modelos de feedback, produção e controle de processo.

A FIGURA 33 abaixo retrata o framework descrito da tecnologia Digital Twin em Sistemas Cyber Físicos:

FIGURA 33 –DIGITAL TWIN EM SISTEMAS CYBER FÍSICOS (FRAMEWORK).



FONTE: Yu, H. et al. (2021).

A Aplicação combinada das tecnologias Digital Twin e Sistemas Cyber Físicos podem também ser empregadas na Engenharia da Manufatura para ajudar diagnósticos em processos contínuos e planejamento da produção, assim como a ajuda para a predição de problemas no ambiente de manutenção.

3.2.2 Aplicação da Tecnologia Digital Twin para o auxílio na otimização de processos e planejamento da produção

Segundo Zhao, P. et al. (2020), O planejamento de processos é o centro da orientação da produção e uma das partes mais críticas para realizar a manufatura inteligente de produtos. As novas tecnologias da informação como big data, inteligência artificial e internet das coisas tem evoluído rapidamente, e como chave da manufatura inteligente, a tecnologia Digital Twin tem sido aplicada frequentemente em processos de produção.

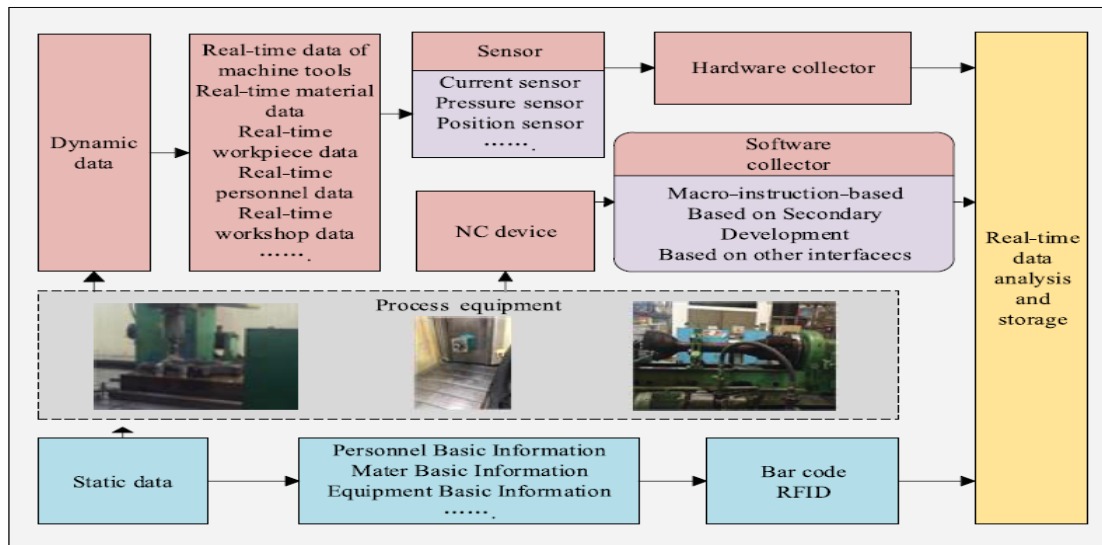
Nesse conceito, na manufatura inteligente, os equipamentos de processo são as peças principais da Manufatura, e os dados em tempo real aparecem no processamento atual do ambiente de trabalho, podendo refletir a sua situação atual, bem como no ambiente e equipamentos de processo.

Ainda segundo Zhao, P. et al. (2020), a definição de dados em tempo real do processo integra a capacidade de não serem obtidos de forma direta e atualizados com a mudança de estado do produto, e os dados dinâmicos são coletados através de equipamentos auxiliares.

Por outro lado, os dados de sensores dinâmicos são responsáveis em guiar os processos de design de nível superior, manufatura atual, programação das tarefas de processamento, manutenção de equipamentos e controle de qualidade na manufatura.

O framework proposto para aquisição dos dados de processo pode ser dividido em duas possibilidades: A primeira, usando o desenvolvimento de software através da interface de protocolos, e a segunda, adicionando sensores nos equipamentos, com a base do processamento das informações, com os modelos de cálculos em tempo real e armazenamento realizado no próprio dispositivo, conforme ilustrado na FIGURA 34 abaixo:

FIGURA 34 –COLETA E PROCESSAMENTO DE DADOS (FRAMEWORK).



FONTE: Zhao, P. et al. (2021).

Segundo Wang, Y. et al. (2021), os produtos complexos têm a característica de múltiplas disciplinas, múltiplos departamentos colaborativos e alta integração de dados. Pelo ponto de vista das condições de produção, a integração de dados entre sistemas de manufatura físicos e modelos de simulação baseados em otimização na simulação, provêm à referência da integração de dados para os produtos complexos.

Dessa forma, conforme as definições de Zhao, P. et al. (2020) e Wang, Y. et al. (2021), é unânime a utilização de modelos de simulação para a referência e modelagem, que podem ser empregadas em cenários de minimização do impacto da indisponibilidade de equipamentos, planejamento e programação da otimização da produção e comissionamento virtual, conforme sugestão de possibilidades sugeridas por Shao, G.; Helu, M. (2020).

A utilização de modelos de simulação através da tecnologia Digital Twin é um importante catalizador para a otimização de processos, sendo em redução de insumos, aumento de disponibilidade de equipamentos, redução de flutuações em parâmetros de controle de processos, até a predição dessas situações, através da coleta de dados de forma histórica.

3.2.3 A Simulação de Processos com o uso da tecnologia Digital Twin

Quando os eventos do espaço físico não podem ser solucionados por modelo de mecanismos de estabilização, o design do processo, a simulação de produção, as

propriedades de interação de simulação operacional e algoritmos direcionados aos dados podem ser usados. A tecnologia da simulação pode ser efetivamente processada com a ajuda da lógica de simulação, mecanismos de raciocínio e modelos de simulação de visual Digital Twin. Adicionalmente, através de modelos de simulação, é possível criar o espaço físico de uma fábrica, bem como a sua análise quantitativa e visual, os parâmetros de processo, as informações do produto, o layout da linha de produção, entre outros.

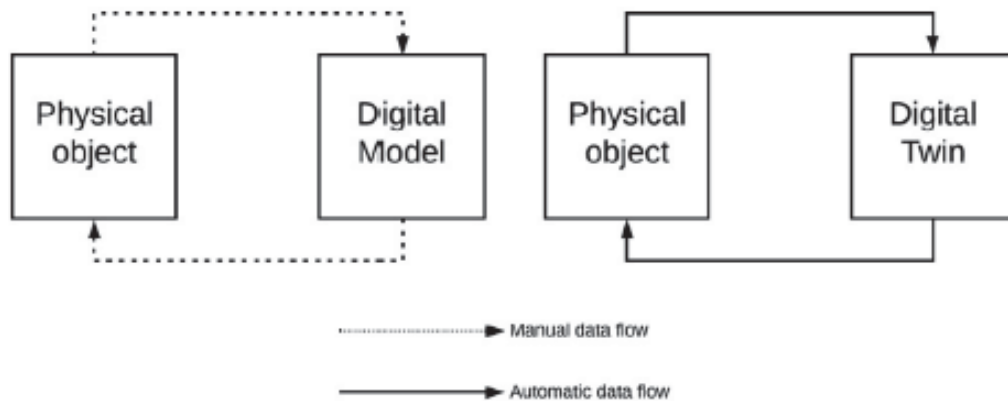
Os diferentes ajustes de parâmetros de processo e o processo real através da simulação em Digital Twin podem ser mais reais e descrevem a operação e evolução da entidade física em sua totalidade, onde os possíveis cenários de processos podem ser simulados completamente em simulação na base da tecnologia Digital Twin, que podem aumentar e otimizar o espaço físico de acordo com os melhores resultados no espaço virtual, assim aumentando a qualidade e eficiência, reduzindo custos e ciclos de produção. CHEN G. et al. (2020).

A Simulação é definida como a imitação da operação de um sistema do mundo real sobre o tempo, através da geração e observação de histórias artificiais, através de inferências retiradas da operação de um sistema real. Com a manufatura, a simulação de eventos discretos (DES) é a técnica mais popular de simulação. A simulação tem sido peça chave para a análise e otimização de sistemas de manufatura, e a tecnologia Digital Twin pode ser usada para sincronizar os status dos equipamentos e futuras programações de operação e manutenção, simular os prováveis futuros entregáveis, determinar soluções de otimização e dar atualizações de sistemas reais.

Nessa mesma filosofia, a simulação tem se mostrado como uma ferramenta eficiente para controle em tempo real de sistemas da manufatura, e a tecnologia Digital Twin é descrita como a última onda em tecnologias de simulação (os chamados Digital Models - DM), podendo envolver atividades de desenvolvimento, implementação e análises de um modelo DES, no ciclo de modelagem. REED, S.; LÖFSTRAND, M.; ANDREWS, J. (2021).

Assim como Kritzinger, W et al. (2018), A definição de Reed, S.; Löfstrand, M.; Andrews, J. (2021) traz uma clara diferenciação do conceito do Digital Model e Digital Twin, conforme a FIGURA 35 abaixo:

FIGURA 35 – DIFERENÇA ENTRE DIGITAL TWIN E DIGITAL MODEL.



FONTE: Reed, S.; Löfstrand, M.; Andrews, J. (2021).

Segundo Glatt, M. et al. (2021), no exemplo de aplicação em processos de manuseio de materiais, ao se conectar um modelo de simulação para um sistema real, percebe-se o potencial para reduzir o risco de distúrbios no seu fluxo, e esta motivação direciona para a utilização do uso de Digital Twin, baseado na simulação física para prever, monitorar e diagnosticar o fluxo físico dos materiais.

No exemplo de aplicações em engenharia de manufatura, um sistema Digital Twin pode ser visto como uma representação de um produto único ativo, que pode ser uma máquina, um motor, um tanque ou serviço, que compreende suas características, propriedades condições e preocupações através de modelos, informações e dados.

Em outras palavras, segundo Reed S. Löfstrand, M.; Andrews, J. (2021) a maior diferença entre o DES DM (Digital Model) em relação ao DES DT (Digital Twin) é que este usa queries de dados, gerador de modelos, rotinas de validação rotinas de análises de resultados e rotinas de implementação de otimização, enquanto o DES DM usa um modelo estático, sem as considerações e variações que o DES DT conseguiria realizar. Isto permite uma análise para ser realizada em ciclos repetitivos que geram otimização do sistema real baseado no seu estado corrente em um tempo real próximo.

4 DESENVOLVIMENTO

Os próximos itens desse capítulo irão descrever os artefatos que compõem as ferramentas tecnológicas utilizadas neste Projeto, através da realização de uma PoC, que foi dividida nas seguintes partes:

- a) Modelagem dos KPIs de consumos da água, vapor e energia no PI-AF®;
- b) Modelagem da predição de consumos de água, vapor e energia no PI-AF®;
- c) Dashboards de visualização dos KPIs no PI Vision® para o grupo de Operação da MP-16;
- d) Dashboards de visualização dos KPIs e Custos no Power BI® para o grupo de Gestão da MP-16;
- e) Interface gráfica de inserção do planejamento da produção para a predição dos consumos de água, vapor e energia via Python® para o grupo de Gestão da MP-16;

Serão abordadas neste capítulo as questões de construção das ferramentas pelo ponto de vista prático, e eventuais detalhes serão explorados nos Apêndices, sendo importante salientar que existem alguns sistemas que já estão implantados no controle da MP-16 que fazem parte da solução final, uma vez que fornecem parte das informações de processo do Sistema implantado, como segue:

- a) DCS: realiza o controle das principais malhas de processo, tais como controle de malhas PID, liga/desliga de motores, entre outros;
- b) PLCs: realizam controles específicos de partes do processo;
- c) QCS: coleta dados de qualidade do perfil da folha de papel que está sendo produzida;

Esses sistemas de controle e monitoramento enviam os dados de processo selecionados para o PIMS, que por sua vez fornece subsídios para a operação e gestão da máquina de papel analisar o comportamento das variáveis de processo escolhidas.

Esses processos existentes já fazem parte do dia a dia da operação, onde o time que faz o controle do processo faz a visualização e controle das diversas malhas de processos, tais como nível, velocidade, temperatura, vazão, entre outros, e ao

mesmo tempo, monitora as curvas de tendências das principais variáveis, que são construídas no PI System®, realizando diversas atividades durante o dia nos ajustes necessários para a estabilidade e disponibilidade da máquina.

4.1 A ESTRUTURAÇÃO DO PRODUTO TECNOLÓGICO

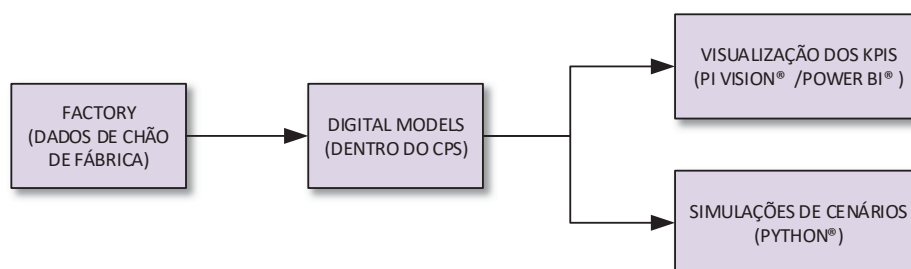
O produto tecnológico foi desenvolvido a partir das dores identificadas no capítulo da Formulação do Problema, com o mote de trazer ao pessoal da Operação e Gestão a geração de inteligência nas informações coletadas no sistema PIMS existente e a aplicação de ferramentas estado da arte para visualização e entrada dos dados de simulação dimensionados, todos destinados para uma melhor gestão dos consumos de água, valor e energia da MP-16.

Basicamente foram aplicados esforços na pesquisa das melhores modelagens das informações coletadas no PIMS existente e nas melhores ferramentas de visualização das informações de forma ágil e intuitiva, e em uma segunda etapa, a construção dessas metodologias através das ferramentas adotadas neste Projeto.

4.1.1 A Arquitetura genérica do Sistema

Com base nas pesquisas realizadas, a Arquitetura genérica concebida aplica os conceitos de Digital Model construídos em Sistemas Cyber Físicos, propondo uma conexão dos dados do ambiente fabril (“Factory”) aos modelos das ferramentas de cálculo (Digital Models), e estão conectados em ferramentas de visualização, com o uso do PI Vision® e Power BI®, bem como a ferramenta de simulação de cenários com o uso do Python®, conforme FIGURA 36 abaixo:

FIGURA 36 – ARQUITETURA GENÉRICA CONCEBIDA



FONTE: O Autor (2022).

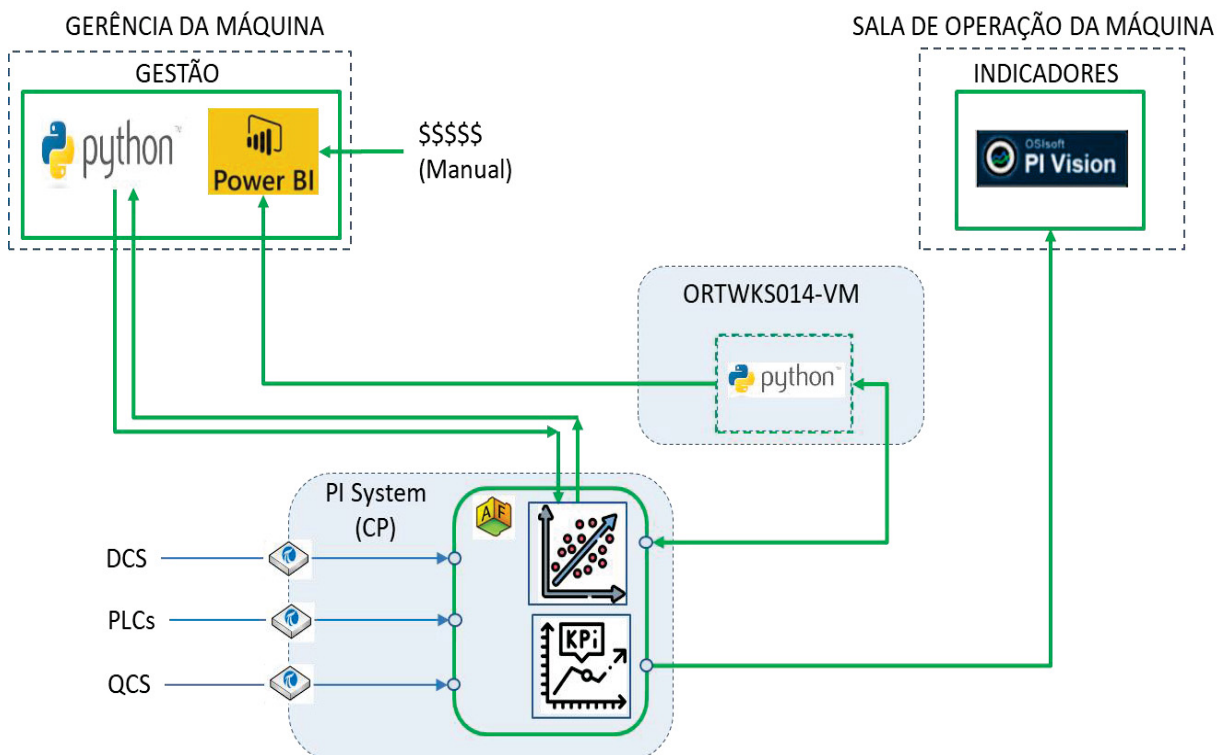
4.1.2 A Arquitetura concebida do Sistema

A coleta das informações no PI System®, em resumo, captura informações em tempo real do processo da MP-16 dos Sistemas DCS, PLCs de processo, e QCS. Este servidor de coleta de dados está fisicamente localizado na unidade Klabin Correia Pinto/SC.

A ferramenta de coleta das informações e disponibilização para o Power BI®, construída em Python®, está fisicamente instalada em uma estação de testes da Gerência de Projetos da Indústria 4.0 (por motivos estratégicos) localizada na unidade Klabin de Ortigueira/PR. Como observação, a solução em teste adotada até que a solução técnica definitiva seja implantada, não provocou qualquer tipo de atraso perceptível para a Operação e Gestão da MP-16 nas informações nos dashboards criados.

A interface com o usuário que faz a previsão dos consumos de vapor, água e energia foi concebida em Python®, sendo uma aplicação disparada da estação do usuário. Assim, a Arquitetura concebida do Sistema criado pode ser visualizada pela FIGURA 37 abaixo:

FIGURA 37 – ARQUITETURA CONCEBIDA DO SISTEMA.



FONTE: O Autor (2022).

A camada de coleta de dados é existente (o pacote PIMS – PI System®) conforme mencionado anteriormente, da empresa OsiSoft®, recém adquirida pela Aveva® que, assim como os pacotes tradicionais de ferramentas Digital Model do mercado, realiza a coleta dos dados através de conectores lógicos específicos, que são interligados logicamente ao “Factory”, coletando os dados de processo do DCS, dos PLCs que estão por sua vez conectados em processos específicos da máquina, e ao QCS, que faz as medições de qualidade do produto.

Para a coleta de dados históricos deste Projeto, que servirá de base para a ferramenta de visualização dos KPIs e simulação de cenários, considerou-se o fluxo normal do processo, conforme abaixo:

- a) O Operador inicia o registro da identificação do rolo jumbo em fabricação, dando entrada do ID na tela do DCS (este processo é automático), que por sua vez envia a informação ao PI System®. Nesse momento, o PI System® coleta esse ID (a identidade ou tag do rolo que está começando a ser produzido), e o seu “time stamp” (o dia, hora, minuto, segundo do início da produção do rolo que está começando a ser produzido);
- b) Para cada rolo jumbo, existe um ID e um “time stamp”, que quando armazenados em sequência, permite o cálculo da diferença entre o início da produção de um rolo jumbo para o próximo (ou o final da produção do rolo atual), gerando o tempo consumido para a produção de cada rolo;
- c) As informações dos KPIs gerados são disponibilizadas para visualização no PI Vision® e Power BI®;
- d) As previsões de consumos por produto são solicitadas localmente nas estações dos usuários, e os cálculos realizados funcionam no PI System®, que são capturados novamente nas estações dos usuários para a visualização em Python®;

Como premissas, todos os cálculos relacionados à geração dos KPIs utilizando interpolação linear e os cálculos relacionados à geração das previsões dos valores de consumos de água, vapor e energia de acordo com o planejamento da produção, utilizando correlação multivariável, estão localizados no PI-AF®. Os cálculos relacionados aos custos associados aos consumos de água, vapor e energia da MP-16 estão localizados no Power BI®.

4.1.3 Ferramentas matemáticas para geração dos KPIs e previsões

Os cálculos dos KPIs e previsões de produção tem como base os dados de chão de fábrica devidamente tratados, e compõem em conjunto a inteligência do Sistema, que está subdividido em:

- a) Via módulo PI Analytics do PI-AF®, são gerados os valores matemáticos dos KPIs por interpolação linear (Vide APÊNDICE 1 para os detalhes construtivos) através dos CEs da água, vapor e energia, disponibilizando os resultados no PI-Vision®, e para o Power BI®, que realiza a análise financeira dos consumos de água, vapor e energia, mostrando os KPIs de forma histórica. A FIGURA 38 abaixo mostra um dos resultados gerados (KPI da água) em função do CE da água:

FIGURA 38 – KPI ÁGUA x CE ÁGUA (EXEMPLO).

Name	Expression	Value at Evaluation
	<pre> ('SSN16100_ATOT_a'*CEA_TOT_Rolo_AtU+'b_Comum') ELSE /* Condição se Produto = SSN16101 */ IF '\CPSRV009 Correia Pinto\Testes PI\MP16\Saidas Rolo AtU Tipo Proc ('SSN16101_ATOT_a'*CEA_TOT_Rolo_AtU+'b_Comum') ELSE </pre>	
KPIaais_Tot_Rolo_AtU	<pre> IF KPIa_Tot_Rolo_AtU < 0.0 THEN 0.0 ELSE IF KPIa_Tot_Rolo_AtU > 10.0 THEN 10.0 ELSE KPIa_Tot_Rolo_AtU </pre>	8.8932

FONTE: O Autor (2022).

- b) Também via módulo do PI Analytics do PI-AF®, são geradas correlações multivariáveis (Vide APÊNDICE 2 para os detalhes construtivos) para a previsão dos consumos de água, vapor e energia, onde os valores planejados de produção são inseridos e tem os retornos previstos para visualização em uma plataforma construída em Python®. A FIGURA 39 abaixo mostra um dos resultados gerados como exemplo (Valor predito de consumo de Água) em função das variáveis de interesse adotadas neste Projeto:

FIGURA 39 – VALOR PREDITO DA ÁGUA (EXEMPLO).

Name	Expression	Value at Evaluatio	Value at Last Trigg	Output Attribute
Água	$-541+2368*X1_SLF16090'+27819*X2_SLF16090'+1.26*X3_SLF16090'+6.62$	696.11	696.11	Água_SLF16090_Calc
$-541+2368*X1_SLF16090'+27819*X2_SLF16090'+1.26*X3_SLF16090'+6.62*X4'-15.59*X5_SLF16090'-49.5*X1_SLF16090'*X4'-46.03*X2_SLF16090'*X3_SLF16090'+54.8*X2_SLF16090'*X4'+0.392*X4'*X5_SLF16090'$				

FONTE: O Autor (2022).

4.1.4 Definição e estruturação das variáveis de interesse

Com os tempos de início e fim de produção de cada rolo jumbo, as seguintes variáveis de processo foram consideradas de interesse para a construção dos modelos:

- a) Vazão volumétrica de água fresca da Máquina de papel 16, em m³/h;
- b) Vazão mássica de vapor de baixa pressão, em t/h;
- c) Vazão mássica de vapor de média pressão, em t/h;
- d) Medição de potência instantânea de consumo da MP-16, em MWh;
- e) Código do produto em fabricação;
- f) ID de identificação do rolo;
- g) Status de quebra de folha;
- h) Tempo de indisponibilidade da máquina no dia, em horas;
- i) Taxa da produção da MP-16, em t/h;
- j) Velocidade da MP-16, em m/min;
- k) Temperatura ambiente da MP-16 em °C;

O APÊNDICE 3 ao final desse trabalho traz um fragmento de uma análise criada utilizando a metodologia Taguchi para a importância de algumas das variáveis de interesse (Quantidade de Produtos, gramatura dos produtos – que se reflete no código do produto em fabricação, estação climática do ano – que foi substituída pela temperatura ambiente no modelo, gerando melhor precisão, número de paradas programadas ou paradas de processo por outros motivos da MP-16, e o número de

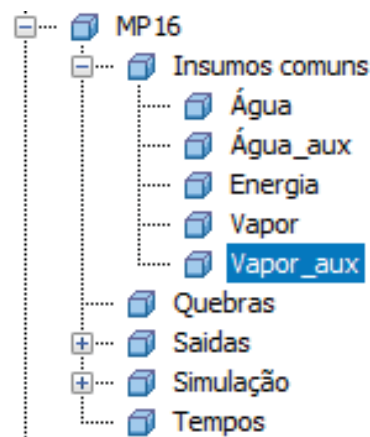
troca de setups na MP-16) em relação ao consumo da água deste Projeto, com o objetivo de comprovar a geração dos cenários de simulação de consumos dos insumos pelo planejamento da produção.

4.1.5 Representação virtual dos consumos de água, vapor e energia na MP-16

Os modelos de simulação dos consumos de vapor, água e energia na MP-16 foram divididos por tipo de produto gerado, isto é, para os diferentes produtos, existirão diferentes variações de comportamento dessas variáveis em função dos dados históricos coletados pelo pacote do PI System®.

Para este Projeto, as construções das representações virtuais foram endereçadas por Insumos Comuns (Água, Vapor e Energia), pelas Saídas (a produção de papel), pela Simulação, Detecção de quebras e Simulação de tempos, conforme FIGURA 40 a seguir:

FIGURA 40 –MODELO VIRTUAL DOS CONSUMOS NO PI SYSTEM®.



FONTE: O Autor (2022).

4.2 KPIS DE CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E ENERGIA

Os KPIs de consumos específicos de água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão e energia da MP-16 foram construídos utilizando interpolação linear para adequar a visibilidade das informações pela Operação e Gestão, uma vez que os dados coletados não traziam informações suficientes para uma análise adequada, conforme demonstrado na TABELA 6 abaixo, que contém um resumo dos consumos

específicos por tipo de produto fabricado (média), desde agosto de 2018 até julho de 2022:

TABELA 6 – VARIAÇÃO DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS NA MP-16

Produtos	CE Água	CE Energia	CE Vapor de Baixa pressão	CE Vapor de Média pressão
Família produto 1	15,44 – 22,54	0,62 – 0,96	1,29 – 1,92	0,82 – 1,16
Família produto 2	14,25 – 19,52	0,53 – 0,81	1,36 – 1,92	0,75 – 1,04
Família produto 3	15,39 – 17,26	0,78 – 0,84	1,51 – 1,70	0,78 – 1,00
Família produto 4	15,17 – 19,83	0,67 – 0,77	1,47 – 1,64	0,74 – 0,96
Família produto 5	14,19	0,60	1,30	1,07
Família produto 6	17,22 – 17,95	0,62 – 0,67	1,51 – 1,61	0,84 – 0,90
Família produto 7	19,95	0,69	1,63	0,82

FONTE: O Autor. (2022).

Uma extensa análise foi realizada com essas informações históricas, representando um universo de 43.862 linhas por 66 colunas, que estão contextualizadas no APÊNDICE 1

Como resultado, obteve-se uma relação direta entre os consumos específicos (verificar na TABELA 6 acima que nem sempre existe uma diferenciação das variáveis com o tipo de produto, podendo levar a Operação e Gestão da MP-16 para um falso diagnóstico).

FIGURA 41 – MEDIÇÃO CE ÁGUA E SEU RESPECTIVO INDICADOR



FONTE: O Autor (2022).

Essa relação direta entre os consumos específicos e indicadores tornou-se indiferente em relação aos produtos por lógica, uma vez que, não importando qual o produto, haverá uma indicação entre 0 e 10 representando como está a saúde desse processo. Esse exemplo pode ser contextualizado com a medição do CE da Água, e

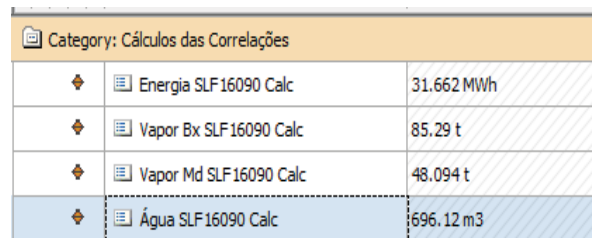
sua relação com o KPI Água, conforme FIGURA 41 acima, para um determinado tipo de produto.

4.3 PREDIÇÃO DE CONSUMOS DE ÁGUA, VAPOR E ENERGIA

Os valores de predição dos consumos de água, vapor e energia na MP-16 foram construídos utilizando correlações multivariáveis com dados de processos selecionados de acordo com critérios de elegibilidade no processo, e dimensionados para trazerem a luz da gestão de consumos da MP-16 a quantidade de água, vapor e energia necessárias para a programação de produção dos próximos períodos.

Parte dos dados utilizados para a construção dos KPIs (43.862 linhas por 66 colunas) foram utilizadas neste contexto. Como resultado, pela escolha do gestor que busca as informações de predição dos consumos, é possível idealizar a quantidade de insumos (Energia, Vapor de média pressão, Vapor de baixa pressão e Água) necessárias para a carteira de produção prevista.

FIGURA 42 – CÁLCULO INSUMOS PARA PRODUTO (EXEMPLO)



Category: Cálculos das Correlações		
◆	Energia SLF16090 Calc	31.662 MWh
◆	Vapor Bx SLF16090 Calc	85.29 t
◆	Vapor Md SLF16090 Calc	48.094 t
◆	Água SLF16090 Calc	696.12 m3

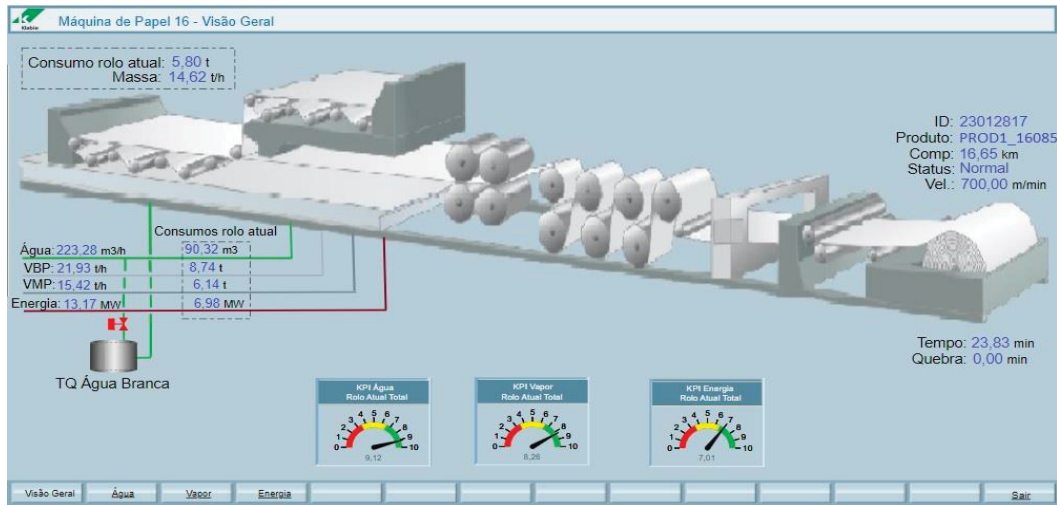
FONTE: O Autor (2022).

A FIGURA 42 acima mostra um exemplo das variáveis obtidas, onde 52 modelos diferentes (13 para cada tipo de insumo) foram concebidos para gerar as predições necessárias. O APÊNDICE 2 traz os detalhes construtivos dessas aplicações.

4.4 DASHBOARDS NO PI VISION® PARA O GRUPO DE OPERAÇÃO

Os dashboards criados foram divididos em Água, Vapor e Energia, com visualizações específicas. Segue abaixo, pela FIGURA 43, a tela de visualização em PI Vision® para visualização geral da MP-16, pelo ponto de vista dos KPIs:

FIGURA 43 – TELA GERAL INDICADORES MP-16 EM PI VISION®

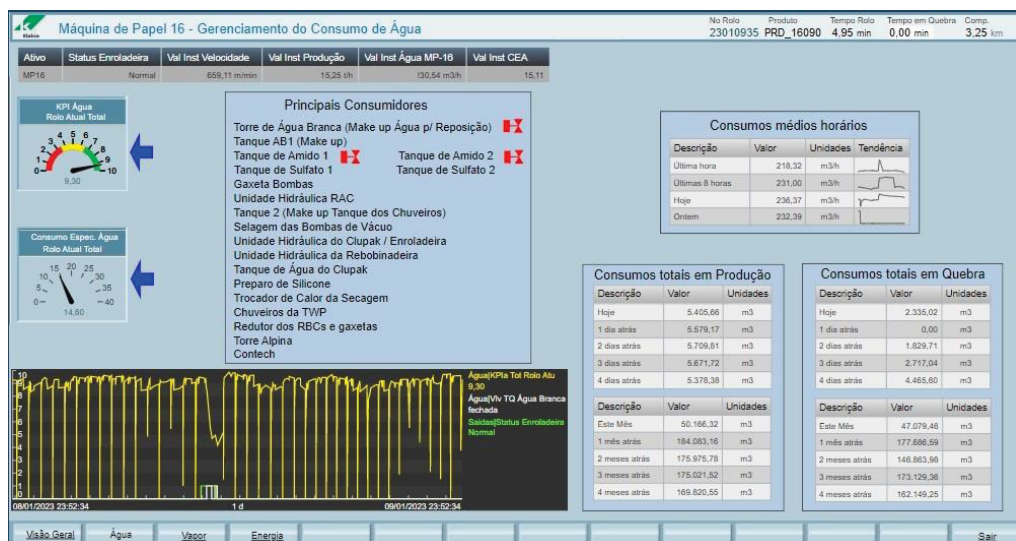


FONTE: O Autor (2022).

Esta tela reúne informações simplificadas para a Operação visualizar os KPIs de Água, Vapor e Energia da MP-16, além de informações importantes como o Status da Máquina (se está em Operação ou Quebra), o Produto em Fabricação, Velocidade, entre outros, bem como o montante de insumos consumidos no rolo em produção.

O Operador tem duas opções para navegar para as outras telas (ou no menu inferior, ou dando um clique sobre o mostrador de KPI. A FIGURA 44 mostra a tela de KPI da Água, como exemplo (as demais telas, para vapor e Energia, seguem a mesma filosofia):

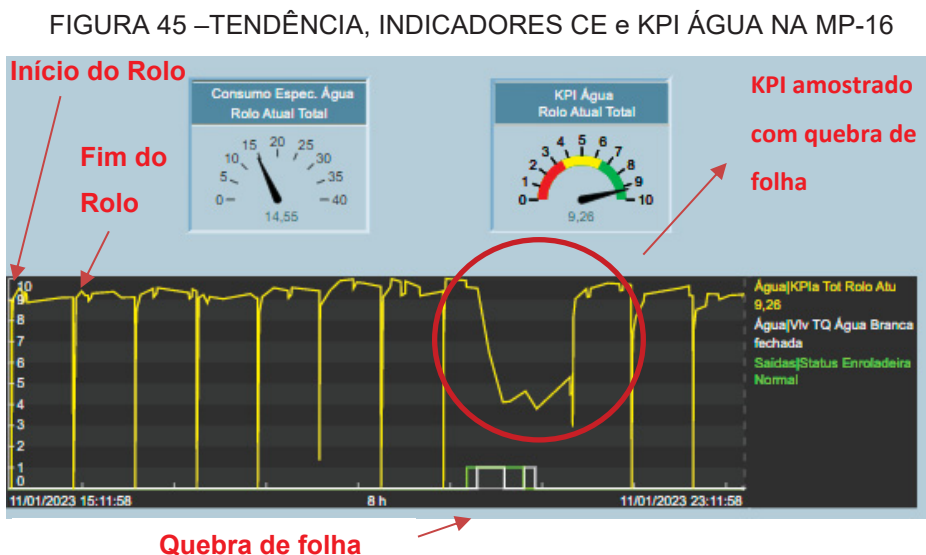
FIGURA 44 – TELA KPI DA ÁGUA DA MP-16 EM PI VISION®



FONTE: O Autor (2022).

Adicionalmente, a tela de KPI da água traz as informações do consumo específico em visualização simples, sem a mensagem se está adequada ou não, e a visão de seu KPI associado ao produto em fabricação (vide canto direito superior, mostrando ainda ID, comprimento, tempo em produção ou quebra). Além disso, algumas informações estáticas solicitadas pela Operação da MP-16, e outras dinâmicas (parte central da tela), mostram alguns dos principais consumidores de água da Máquina. Ainda são amostradas informações de tendência de consumos, consumos dos últimos 4 dias e dos últimos 4 meses, tanto em produção quanto em quebra.

Como destaque nas telas feitas com o PI Vision®, temos os indicadores de Consumos Específicos, os KPIs calculados, e as curvas de tendência dos KPIs, sempre associados ao fator quebra da folha de papel na Máquina. As tendências mostram o início e fim de cada rolo jumbo em produção, bastando interpretar que o início de cada rolo acontece uma inicialização dos cálculos, e o KPI “começa” no nível 0 (zero). Na FIGURA 45 abaixo, temos o exemplo de uma quebra de folha, continuação do consumo de água com a folha quebrada, e consequente diminuição do KPI do consumo de água, visualizada no PI Vision®.



FONTE: O Autor (2023).

A Operação e Gestão da MP-16 agora tem a capacidade de avaliar se os consumos associados às quebras são coerentes, isto é, se existem condições de

consumos coerentes com a produtividade. Tais análises serão exploradas no capítulo DISCUSSÕES e CONCLUSÕES.

Adicionalmente e tipicamente falando, as telas confeccionadas no PI Vision® trazem informações de totalizações diárias de consumos de insumos (no dia e até nos últimos 4 dias), no mês (desde o dia um de cada mês até o dia corrente, além os dois últimos 4 meses), além dos consumos na última hora, nas últimas 8 horas, no dia atual, e no dia anterior, tanto para a máquina em produção, quanto para a máquina parada.

4.5 DASHBOARDS NO POWER BI ® PARA O GRUPO DE GESTÃO

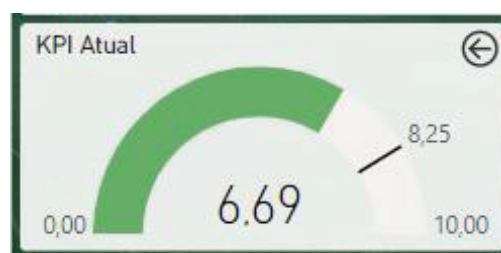
Os dashboards criados foram mais uma vez divididos em Água, Vapor e Energia, com um foco na visualização dos KPIs por rolos e nos custos associados, baseados nos históricos desses indicadores, e com os custos dos insumos, é possível agora determinar os custos reais por Rolo, os custos de produção do período, e o quanto se desviou positiva ou negativamente do alvo (KPI = 8,25), mostrando os custos salvos ou adicionais.

Foram criadas em estrutura de árvore, onde a partir de uma Tela de Visão Geral, é possível navegar nos detalhes dos KPIs e custos de Água, Vapor e Energia, em um total de 15 telas.

As telas marcadas com o sufixo “(KPIs)” mostram tipicamente:

- a) Os indicadores numéricos em forma de gauge no lado esquerdo da tela em forma de meia lua, com variação de cores baseados nas criticidades desenhadas nos gauges circulares desenhados nas telas do PI Vision® com a mesma filosofia (de 0.0 até 3.5 = vermelho, de 3.5 até 6.5 = amarelo, de 6.5 até 10.0 = verde) conforme no exemplo abaixo, pela FIGURA 46, com a indicação do KPI:

FIGURA 46 – GAUGES KPIS ATUAL NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

- b) Gráficos de KPI Total em forma de barras verticais que representam os KPIs integrados do início ao fim de cada rolo (cada cor representa um rolo produzido), desde o início do dia corrente selecionado, conforme FIGURA 47 abaixo, como exemplo:

FIGURA 47 – GRÁFICO DE KPIs DO DIA CORRENTE NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

- c) Indicadores numéricos no lado esquerdo da tela com os KPIs médios do período, conforme FIGURA 48 abaixo, como exemplo:

FIGURA 48 – KPIs MÉDIOS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

- d) Gráfico de barras por Rolo produzido mostrando os consumos totais e KPIs totais, conforme padrão de gradiente de cores (Vide FIGURA 49: ISA101 (2017); NBR6493 (2019), para todos os insumos, exceto para o Vapor, que teve uma leve variação).

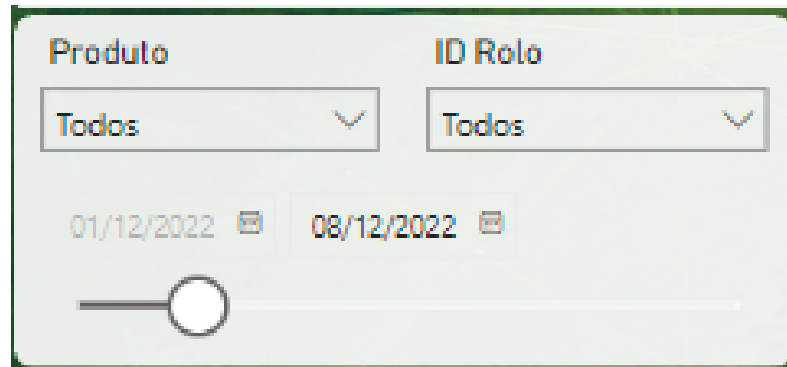
FIGURA 49 – CONSUMOS MÉDIOS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

- e) Filtros de visualização da data desejada, produto e rolo, no lado esquerdo inferior, conforme FIGURA 50 abaixo:

FIGURA 50 –CONSUMOS MÉDIOS DO DIA CORRENTE NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

As telas dos KPIs mostram tipicamente, além das já indicadas nas Telas Gerais, um quadro de diferença de custo ideal por rolo. Baseado na referência de KPI = 8.25, calcula-se o valor adicional (em vermelho) ou salvo (em verde) por rolo produzido, em reais, de acordo com tabela de custos alimentada no Power BI®, de acordo com a FIGURA 51 abaixo:

FIGURA 51 –DIFERENÇA DE CUSTOS IDEAL POR ROLO NO POWER BI®

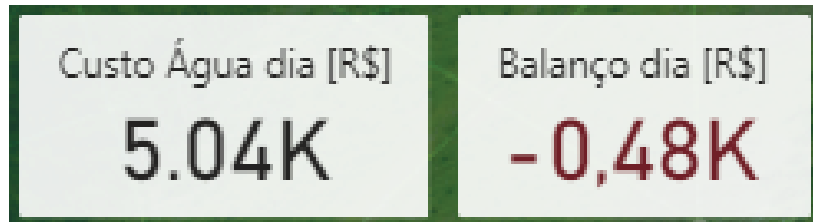


FONTE: O Autor (2022).

- a) Custo da Água por dia e Balanço: o valor sumarizado diário desde 00:00 hs até o momento da leitura do custo do insumo, em reais, (janela da

esquerda) e Balanço do dia (janela da direita), com o montante em reais do valor gasto a mais (valores negativos) ou salvos (valores positivos) em relação à referência de KPI = 8.25, de acordo com a FIGURA 52 abaixo:

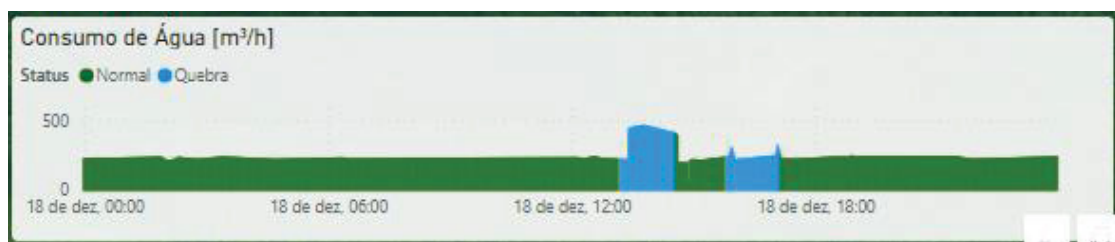
FIGURA 52 –CUSTO DA ÁGUA E BALANÇO POR DIA NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

- b) Gráfico de barras por Rolo produzido mostrando os consumos totais e KPIs totais, semelhante aos típicos das telas com KPIs;
- c) Consumo do insumo (água, em m³/h vapor, em t/h ou energia, em MWh), em forma de gráfico de barras, destacando quando acontece uma quebra de folha em cor diferente, de acordo com o exemplo da FIGURA 53 abaixo, para o consumo de água:

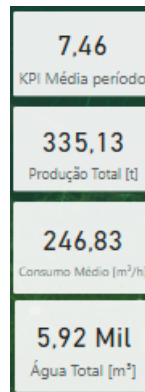
FIGURA 53 – CONSUMO DO INSUMO NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

- d) Variação do KPI no período: mostrando os KPIs totais por rolo, semelhante aos típicos das telas com KPIs;
- e) Do lado direito, da tela, os KPIs médios do dia (desde 00:00 hs até o momento da visualização), a produção total realizada, o consumo médio do insumo (para água, em m³/h, para vapor, em t/h, e para energia, em MWh), de acordo com o exemplo da FIGURA 54 abaixo:

FIGURA 54 – KPIs, PRODUÇÃO E CONSUMOS NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).

O Apêndice 4 mostra um exemplo de construção das telas de visualização dos Custos no Power BI®.

4.6 INTERFACE GRÁFICA VIA PYTHON® DA PREDIÇÃO DE CONSUMOS

O Dashboard criado para a visualização das predições de consumos de água, vapor de média pressão, vapor de baixa pressão e energia para o planejamento de produção prevista é também uma interface do usuário para a inserção dos dados que se desejam simulação. Foi concebida usando Visual Studio Code®.

FIGURA 55 – CÁLCULO INSUMOS PARA PRODUTO (EXEMPLO)

Estimativas Consumo MP16
 Água, Vapor Bx, Vapor Md, Energia

User: KLABIN/KLMS00131594 Data: Monday, 16. January 2023 08:03PM

Produto: PRD116091 Peso[Ex: 10.55]: 80

Console:
 16/01/2023 20:04:58
 Realizando Cálculos!

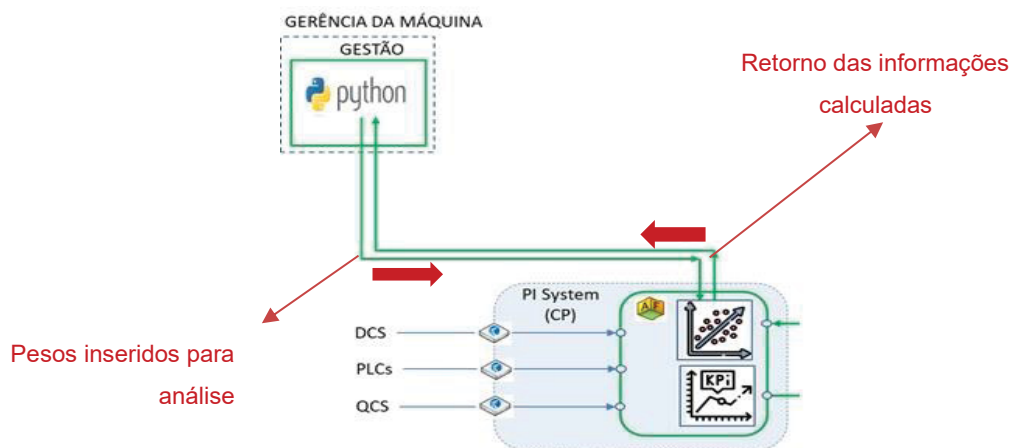
Produto	Peso [t]	Água [m³]	Vapor Bx [t]	Vapor Md [t]	Energia [MWh]
PROD2_16091	100	1482.45	164.22	93.64	70.28
PROD2_16090	100	1828.28	169.78	84.43	61.55
PROD1_16091	80	1236.94	112.39	83.26	78.56
Total	Peso 280.00	Água 4547.67	Vapor Bx 446.39	Vapor Md 261.33	Energia 210.39

FONTE: O Autor (2023).

É possível assim a entrada da informação do peso programado (em toneladas), e o Sistema de predição retorna as informações dos consumos de água (em m³), de vapor de média e baixa pressão (em ton) e de energia (em MW), conforme FIGURA 55 acima, de forma individual (por produto) e totalizada.

A FIGURA 56 abaixo mostra o fluxo dos dados em um resumo da arquitetura do Sistema, onde o usuário insere os valores desejados para simulação (pesos por tipo de produto), que são enviados para o PI-AF®, que contém os modelos de predição de consumos. Quando executados, geram os valores previstos, e são enviados de volta para o usuário.

FIGURA 56 – FLUXO DAS INFORMAÇÕES (PREDIÇÃO DE INSUMOS)



FONTE: O Autor (2022).

O Apêndice 2 detalha a forma como as funções multivariáveis foram geradas, como as informações entram no PI-AF®, como são gerados os conectores para a captura das informações no Python®.

4.7 DETALHAMENTO DO FRAMEWORK PROPOSTO

Conforme proposta inicial da construção de um framework ilustrado no capítulo da Abordagem Metodológica dessa pesquisa, e analisando a base teórica que sustenta esse trabalho, subdivide-se as seguintes divisões para a composição de um modelo (framework) de replicação desse trabalho:

4.7.1 Framework de captura de dados dos processos

Analisando as pesquisas realizadas por De Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016), com o ponto de vista da integridade dos dados, e de Hendrickx, T. et al. (2015), com o ponto de vista de conhecimento dos dados, sugere-se:

- a) A criação de um repositório de dados único, não importando a origem, para facilitar a filtragem das informações relevantes às análises;
- b) Filtragem dos Dados: A elaboração de uma metodologia para filtragem das informações relevantes para as análises, com as seguintes etapas:
 - eliminação de dados oriundos de falhas de comunicação, erros de leitura, entre outros;
 - eliminação de dados oriundos de erros de leitura, tais como: velocidades negativas, níveis negativos, fluxos reversos, entre outros;
 - eliminação de informações inconsistentes com o processo, tais como níveis muito acima de 100%, temperatura da água bem menor que 0°C ou bem acima de 100°C, entre outros;
- c) Redução dos dados: Dependendo da análise, aplicar as reduções necessárias para uma melhor Mineração dos Dados, baseado em parâmetros temporais ou quantitativos (essa fase depende de conhecimento prévio do processo);
- d) Mineração dos Dados: aplicado caso a caso, soma características especiais aos dados reduzidos. Exemplo: criar contador de eventos nulos ou acima de determinado valor para análises futuras;
- e) Interpretação dos dados: com os dados filtrados, reduzidos e minerados estabelecer uma visão que permita a obtenção de inteligência nas informações. Exemplos: geração de correlações, interpolações, etc.

4.7.2 Framework para o uso dos Modelos Digitais em Sistemas Cyber Físicos

Analisando as pesquisas realizadas por Tao, Fei et al. (2019) pelo ponto de vista das dimensões entre mundo físico e interpretado, as pesquisas realizadas por Yu, H. et al. (2021) pelo ponto de vista da distribuição do Digital Twin em Sistemas Cyber Físicos, e das pesquisas realizadas por Zhao, P. et al. (2020), pelo ponto de vista da ocupação física dos modelos e da forma de coleta dos dados, sugere-se:

- a) Coleta de dados real: trabalhar os conectores do processo conforme o real medido. Exemplo: coleta de informações dos equipamentos visualizados pela operação devem ser os mesmos que servirão para a construção das simulações;
- b) Reprodução do Mundo interpretado: reproduzir a árvore do equipamento a ser trabalhada, do macro para o micro. Exemplo: reproduzir o maquinário, o equipamento, e as grandezas físicas associadas, nessa ordem;
- c) Modelos de simulação no CPS: adotar como premissa que todos os cálculos de simulação devem ser processados no mesmo Sistema Cyber Físico adotado para o Projeto e que realiza a coleta dos dados. Exemplo: Se o CPS adotado é o PI System® e ele é o responsável pela coleta dos dados, então todos os modelos de simulação devem ser processados no PI System®;

4.7.3 Framework de visualização de simulações e KPIs

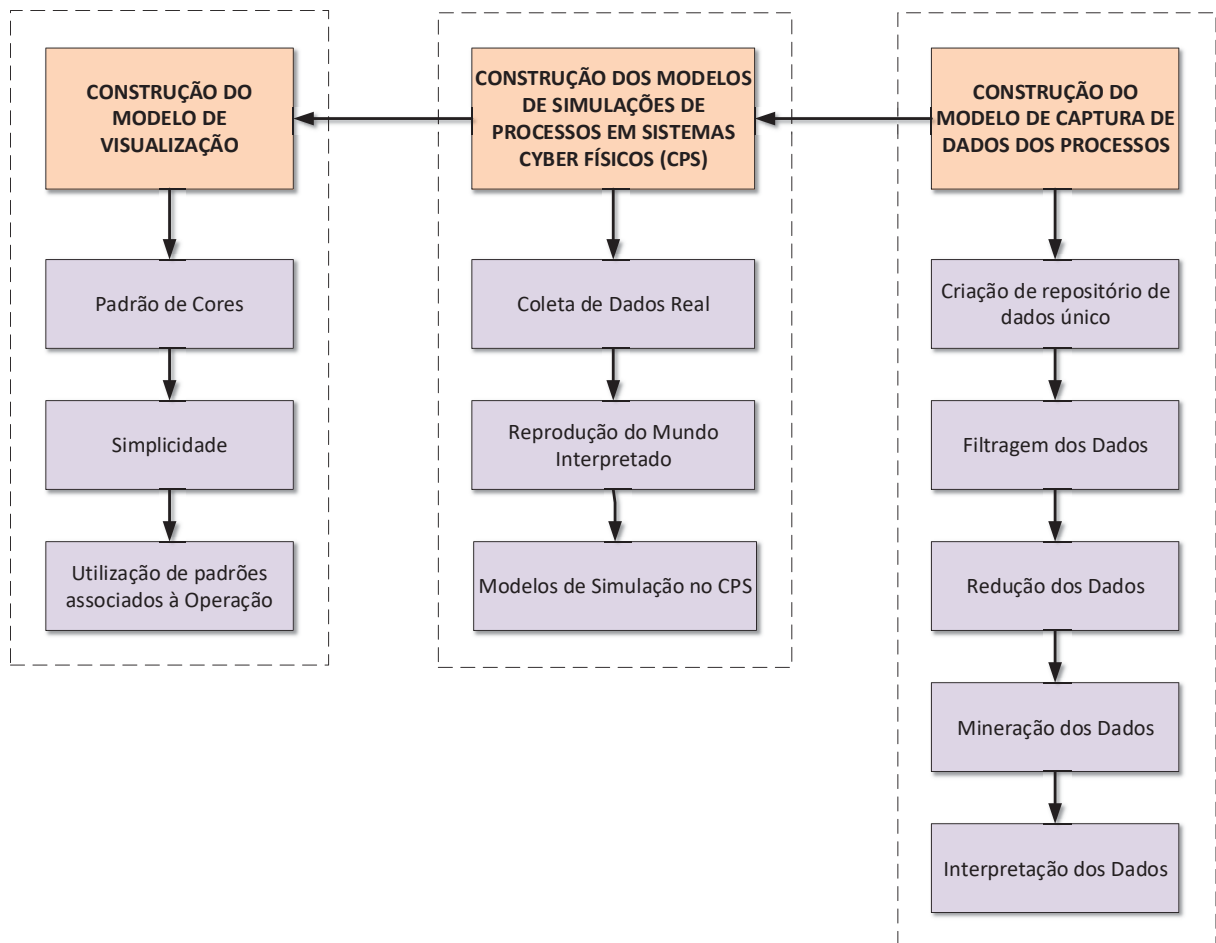
Analisando as pesquisas realizadas por Bach, B. et al. (2022) e as considerações obtidas na referência ISA101 (2017), sugere-se:

- a) Padrão de cores: Utilização de cores associadas para o conforto visual da Operação;
- b) Simplicidade: Utilização da simplicidade para a visualização de KPIs, utilizando modelos visuais e interpretativos;
- c) Utilização de padrões associados a Operação;

4.7.4 Representação gráfica do Framework

Os frameworks de construção da captura de dados dos processos, de construção dos modelos de simulações de processos em sistemas cyber físicos, e da construção do modelo de visualização, estão mapeados conforme a FIGURA 57 abaixo:

FIGURA 57 – FRAMEWORK FINAL PROPOSTO



FONTE: O Autor (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando a teoria pesquisada e o framework proposto, este capítulo demonstra os resultados obtidos com o Sistema proposto e algumas considerações obtidas, em 3 tópicos:

- a) KPIs a partir dos CES no PI Vision®;
- b) Visualizações custos por produto no Power BI®;
- c) Predição de consumos por produto utilizando Python®;

5.1 KPIS A PARTIR DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS NO PI VISION®

As informações visuais de destaque para os usuários são o gráfico de tendências e os indicadores em forma de gauge, com algumas informações adicionais que, em conjunto, contribuem para a tomada de decisões da Operação e Gestão. Bach B. et al. (2022). Em relação aos gráficos de tendências, conforme adiantado no capítulo do Desenvolvimento, conseguem mostrar com clareza o início e final de cada ciclo de produção de rolo jumbo, indicando os KPIs integrados nesse período. É possível ainda ao operador mudar a escala de visualização, desde horária até mensal, com os exemplos coletados abaixo, conforme FIGURAS 58 e FIGURA 59:

FIGURA 58 – ESCALA DE VISUALIZAÇÃO DOS KPIs PARA 1 HORA



FONTE: O Autor (2023).

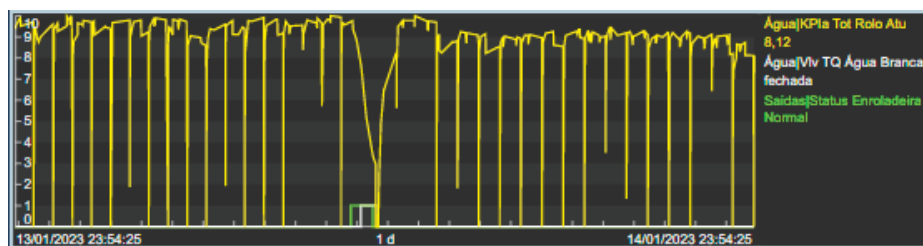
FIGURA 59 – ESCALA DE VISUALIZAÇÃO DOS KPIs PARA 8 HORAS



FONTE: O Autor (2023).

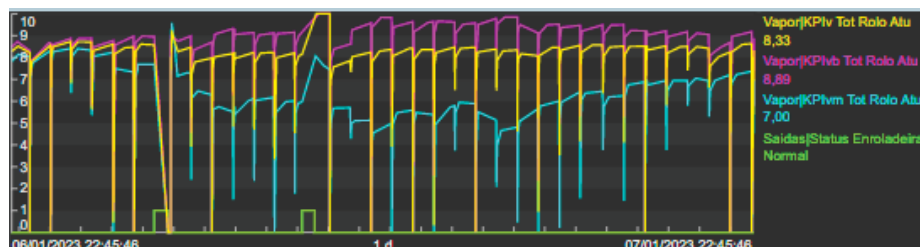
A forma de visualização dos KPIs fica ilegível quando amostrada com tempos de 7 dias e 1 mês, impossibilitando a análise. Isso acontece pois o tempo normal médio de produção de um rolo jumbo na MP-16 oscila entre 30 e 40 minutos, fazendo com que os tempos ideais de visualização sejam de 8 horas e 1 dia. Também é possível a visualização do comportamento dos KPIs quando acontece uma quebra ou um fenômeno de alto consumo, conforme FIGURAS 60 e 61 abaixo:

FIGURA 60 –VISUALIZAÇÃO DO KPI QUANDO FOLHA EM QUEBRA



FONTE: O Autor (2023).

FIGURA 61 –VISUALIZAÇÃO DO KPI QUANDO EM ALTO CONSUMO



FONTE: O Autor (2023).

A visualização do comportamento dos KPIs quando a folha quebra (observar barra na cor verde: quando em quebra, o valor é igual a 1) é de uma tendência de diminuição, isto é, a produção acaba e o consumo de insumos permanece (levando o KPI tender a zero) ou, após análise e visualização do tipo de fenômeno (excesso de consumo, sem causa aparente, por exemplo), a operação toma a ação. Dependendo da ordem dos acontecimentos, os cálculos dos KPIs tomam as seguintes regras:

- a) Se o processo parar (Produção = 0) e em seguida o consumo do insumo começar a diminuir, a relação matemática vai funcionar e o cálculo do KPI vai tender a zero. Quando o consumo cessar (Insumo=0), o cálculo do KPI

é interrompido (detecção de denominador nulo) e permanece o último valor calculado.

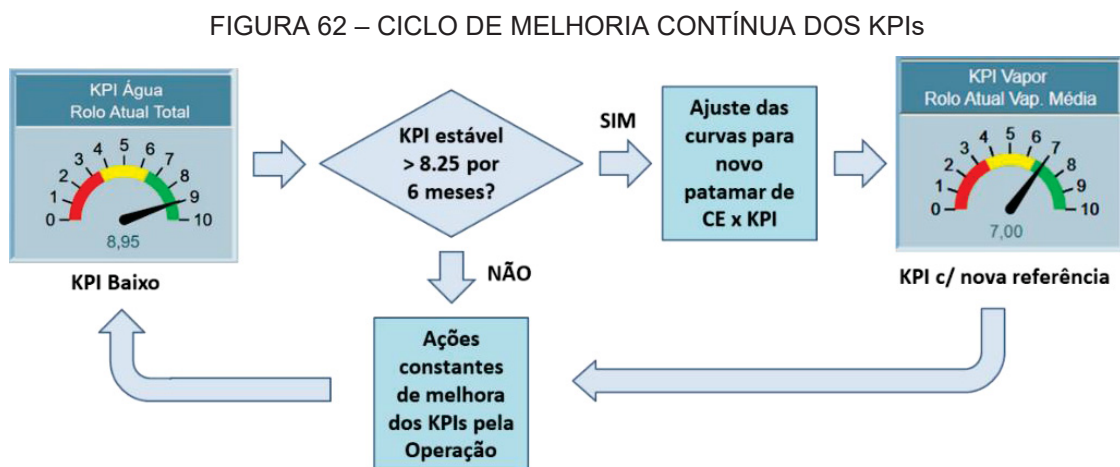
- b) Se o consumo cessar (Insumo = 0), mas a produção continuar, o cálculo é interrompido (detecção de denominador nulo) e permanece o último valor calculado.

Em relação aos gauges dos KPIs, é possível visualizar de forma eficaz os consumos específicos, e os seus respectivos KPIs calculados, onde foi concebido uma forma gráfica em forma de cores (vermelho = ruim, amarelo = atenção, verde = bom) para chamar a atenção do operador. ISA101 (2017).

Uma possibilidade integrada à essa ferramenta será uma constante melhoria dos processos relativos aos consumos de água, vapor e energia, pois com o tempo de uso, o grupo de Operação e Gestão irão começar a mitigar mais rapidamente os problemas, que por sua vez levarão os KPIs a ficarem acima de 8.25 por mais tempo.

Quando esse cenário acontecer, a ação do grupo de Gestão e Operação será a solicitação para o grupo técnico responsável em manter o Sistema para rodar novamente a modelagem matemática de formação dos KPIs em função dos CEs com os novos dados históricos, alimentar as novas curvas no PI-AF®, e assim garantir que sempre aconteça um “alvo” de consumos ótimos para o Processo. Esse tema será explorado no capítulo de Recomendações para trabalhos futuros.

A FIGURA 62 demonstra esse ciclo, a seguir, como sugestão de metodologia:



FONTE: O Autor (2023).

5.2 VISUALIZAÇÃO DE CUSTOS POR PRODUTO NO POWER BI®

As principais informações para a visualização de custos por produto são as possibilidades do imediato reconhecimento e as ações da operação quando detectarem que os custos estão acima do alvo (KPI=8.25) admitido, onde é possível a visualização por rolo, e também pelo período, conforme detalhado no capítulo do Desenvolvimento, sendo as principais funcionalidades para a Operação e Gestão da MP-16, conforme exemplo da FIGURA 63:

FIGURA 63 –VISUALIZAÇÃO DOS CUSTOS QUANDO EM ALTO CONSUMO



FONTE: O Autor (2023).

Assim como na ferramenta de visualização dos KPIs no PI Vision®, a ferramenta de visualização do Power BI® que possibilita acompanhar os custos incorridos, bem como os desvios financeiros positivos ou negativos por rolo e por período, também fará com que o grupo de Operação atue para a melhoria dos processos.

Neste mesmo raciocínio, apesar do grupo de gestão já possuir a noção financeira no processo corrente (de uma forma indireta, via KPIs), haverá a informação de custos de forma quase imediata (defasagem de até 30 minutos, refletindo o tempo de atualização configurado do Power BI® para trazer as informações do PI AF®), contribuindo para a estabilidade do processo e conseqüente queda dos consumos na MP-16.

Existe uma defasagem de indicadores financeiros da ferramenta de visualização de custos no Power BI®, que é objeto desse trabalho, em relação à visão financeira corrente na unidade, e que está em fase de adaptação pelo grupo de

Operação/Gestão. Esse tema será discutido no capítulo de Recomendações para trabalhos futuros.

Em relação a medição dos ganhos que as ferramentas de visualização trouxeram, foi realizada a comparação dos consumos específicos para água, vapor de média pressão, vapor de baixa pressão e energia, referente ao último trimestre de 2022 (antes do início da utilização das ferramentas) e do primeiro trimestre de 2023 (período imediatamente após a utilização das ferramentas), onde os seguintes resultados foram alcançados:

TABELA 7 – MEDIÇÃO DE EFETIVIDADE DA FERRAMENTA DE VISUALIZAÇÃO DE KPIs

Produto	CE último trimestre de 2022	CE primeiro trimestre de 2023	Reduções de consumos alcançadas (%)
Água	18,41	16,33	11,33
Vapor de média pressão	1,27	1,11	12,30
Vapor de baixa pressão	1,62	1,40	13,50
Energia	0,96	0,90	6,50

FONTE: O Autor (2023).

A análise acima considerou a medição dos consumos e as produções médias somadas nos trimestres, estabelecendo-se assim uma melhor base de comparação, o que sugere uma melhora da utilização da água, vapor de média pressão, vapor de baixa pressão e energia, comparando-se os mesmos produtos fabricados nos períodos.

Em relação à comparação de medições de ganhos em produtos diferentes, houve redução de forma diferenciada. Como exemplo, para a água, apesar da redução média obtida no trimestre para todos os produtos produzidos neste período de 11,33%, para determinado produto houve redução de consumo de 17,64%, e para outro produto na faixa de 1,03%. Isso pode ser explicado pela quantidade de amostras na assertividade do cálculo do KPI para esses produtos (para os produtos com mais amostras, a tendência é uma melhor assertividade).

5.3 SISTEMA DE PREDIÇÃO DE CONSUMOS DE INSUMOS POR PRODUTO NO PYTHON®

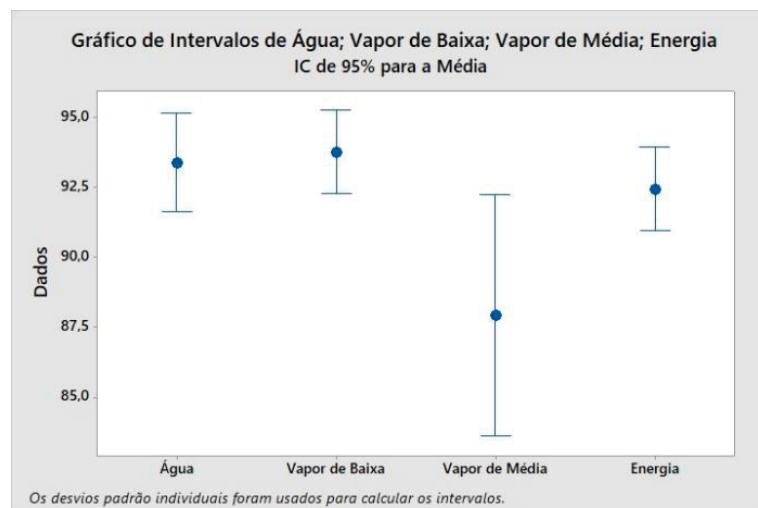
Dos 20 produtos inicialmente considerados para idealização das funções de correlação multivariáveis para os cálculos de predição dos insumos (água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão e energia) através da quantidade de setups, quantidade de quebras, velocidade da máquina, temperatura ambiente e o peso (está última, a variável de entrada), 7 deles não obtiveram sucesso nos cálculos, devido a:

- a) Quantidade insuficiente de amostras;
- b) Erro na geração das funções multivariáveis pela falta de preditores contínuos confiáveis, ou seja, as amostras coletadas não se mostraram confiáveis pela análise do Minitab®, mesmo após a eliminação de ruídos, dados inválidos, etc.;

Sendo assim, dos 20 produtos selecionados escolhidos pelo pessoal da Gestão e Produção da MP-16 (o critério de escolha foi relacionado aos produtos mais produzidos nos últimos 2 anos), 13 obtiveram sucesso na geração dos cálculos, sendo possível a criação de 52 modelos de correlações multivariáveis (13 para a água, 13 para vapor de baixa pressão, 13 para vapor de média pressão, 13 para energia), o que atende a pelo menos 95% dos planos de produção atuais, e que tiveram valores de confiabilidade dos cálculos (R^2 e p) muito bons.

O GRÁFICO 2 abaixo mostra uma síntese desses resultados obtidos com a ajuda do Minitab®, para os resultados dos R^2 obtidos:

GRÁFICO 2 – RESUMO DOS ÍNDICES R^2 OBTIDOS EM %

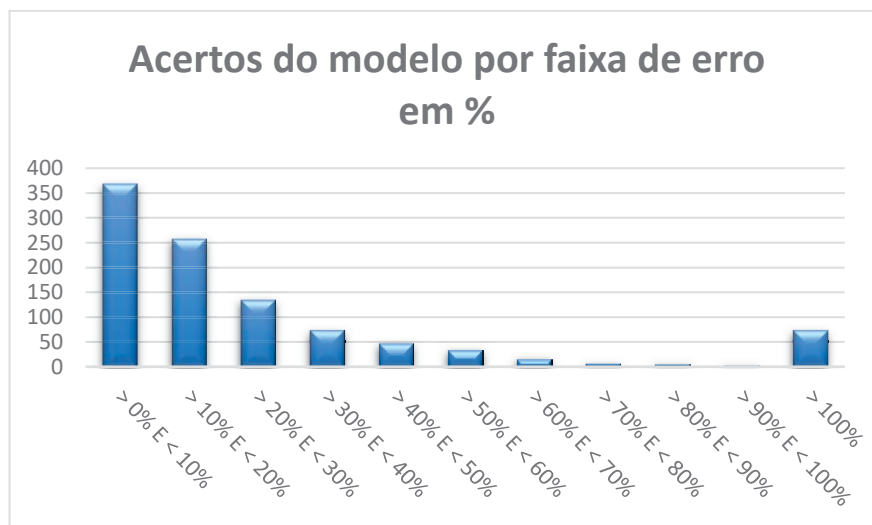


FONTE: O Autor (2023).

Por outro lado, a análise dos valores obtidos do R^2 para as correlações multivariáveis obtidas para os produtos nem sempre estabelecem os valores reais dos consumos de água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão e energia.

O GRÁFICO 3 abaixo mostra o resultado de assertividade da correlação multivariável do produto PROD1_16085 (que obteve 1022 amostras para a geração do modelo – a maior quantidade registrada):

GRÁFICO 3 – NÚMERO DE ACERTOS x FAIXAS DE ERRO EM %



FONTE: O Autor (2023).

Verifica-se que a correlação multivariável gerada conseguiu ter um índice de assertividade muito bom (< 30%) para variações dos resultados calculados versus o real para quase 75% do total de amostras brutas (368 amostras com erros entre 0% e 10%, 258 amostras entre 10% e 20% e 135 amostras entre 20% e 30%).

Por outro lado, o resultado não foi tão bom para os outros 25% das amostras, (73 amostras com erros entre 30% e 40%, 47 amostras entre 40% e 50%, 33 amostras entre 50% e 60%, 16 amostras entre 60% e 70%, 7 amostras entre 70% e 80%, 6 amostras entre 80% e 90%, 4 amostras entre 90% e 100%, e 73 amostras com erros maiores que 100%).

Analisando os resultados e comparando-os com o total de amostras (1022, para o produto escolhido nessa análise), verifica-se que o coeficiente de quebras e troca de setups estão diretamente associadas às quantidades de amostras com melhor assertividade, conforme TABELA 8 abaixo:

TABELA 8 – FAIXAS DE ERRO x QUANTIDADE DE ACERTOS DO MODELO

Descrição	Total de Eventos	Quebras associadas	Troca de Setups Associados
Erros menores que 30%	761	402	58
Erros maiores que 30%	261	87	14

FONTE: O Autor (2023).

Percentualmente falando, praticamente 33% das quebras interferiram nos resultados da assertividade nos erros maiores que 30%, e quase 61% nos erros menores que 30%. Ao analisarmos os mesmos números para as trocas de setups, apenas 5% interferem diretamente nos resultados da assertividade dos erros maiores que 30% e 7% dos casos nos resultados da assertividade dos erros menores que 30%, o que faz chegar ao entendimento que as trocas de setups pouco interferiram nos resultados de erros ou acertos das amostras.

Essa associação permite o entendimento que a quantidade de quebras está bem associada ao resultado de assertividade do modelo por eliminação, pois excluindo-se o peso e temperatura ambiente (que são variáveis fora dos controles), essa seria a maior interferência.

Em relação aos resultados até agora obtidos com a ferramenta de predição de consumos, os seguintes números foram alcançados, realizados no último mês subsequente à disponibilização da ferramenta:

TABELA 9 – MEDIÇÃO DE EFETIVIDADE DA FERRAMENTA DE PREDIÇÕES DE CONSUMOS

Produto	Erro (%)
Água	26,5
Vapor de média pressão	- 23,2
Vapor de baixa pressão	19,5
Energia	- 27,6

FONTE: O Autor (2023).

Os resultados alcançados sugerem um índice compatível com os resultados intermediários alcançados pelo modelo.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conteúdo desse trabalho teve por foco a mitigação dos problemas apresentados no capítulo da Formulação do Problema, e ocasionaram diversas pesquisas científicas pelas metodologias RBS e RBA descritas no capítulo da Abordagem Metodológica, que trouxe a base teórica para o entendimento e compreensão das tecnologias aplicadas nesta pesquisa, descritas em detalhes no capítulo do Desenvolvimento e com as respostas obtidas dos Sistemas criados no capítulo Resultados e Discussões.

Foram criados três Sistemas distintos, descritos no capítulo Objetivos, cada um deles com características distintas que, em conjunto, construíram a base de mitigação do gerenciamento dos consumos de água, vapor de média pressão, vapor de baixa pressão e energia na MP-16.

Os resultados alcançados pelo Sistema de visualização de KPIs para a Operação (o primeiro Objetivo Específico descrito) se mostrou muito prático pelo ponto de vista de visualização da utilização dos insumos estudados (água, vapor de média pressão, vapor de baixa pressão e energia), não importando o produto que está em produção, e traz uma indicação visual prática e instantânea desses indicadores, trazendo a luz da Operação se estão trabalhando de forma adequada em relação aos históricos das receitas, já trazendo os primeiros resultados, ainda na fase de aprendizagem do Sistema da PoC em andamento, implantada em dezembro de 2022, e já em estudo para a implantação em todo o processo da unidade, de acordo com a diretriz da alta gestão.

Este Sistema tem uma grande possibilidade de melhoria contínua, descritas no capítulo dos Resultados e Discussões, para que aconteça de forma periódica uma revisão nas curvas matemáticas elaboradas para a construção dos KPIs em função dos CEs, criando uma enorme possibilidade de constante aprimoramento dos controles e processos relativos ao uso dos insumos que são o foco desse estudo.

Em relação ao Sistema de visualização dos custos da água, vapor de média pressão, vapor de baixa pressão e energia para o processo produtivo (o segundo Objetivo Específico descrito), também não importando o produto ora em produção, trouxe a luz da Gestão uma visão estratégica e até o momento não explorada, reforçando a visão estabelecida na ferramenta de KPIs on line, e gerando uma visão de custos por rolo jumbo. Os resultados práticos já foram alcançados também em

função da fase de aprendizado do Sistema da PoC em andamento (implantada em dezembro de 2022), e assim como o sistema de visualização dos KPIs, já está em estudo para a implantação em todo o processo da unidade. Também pode contribuir para um processo de melhoria contínua dos processos, aprimorando o uso dos insumos que são o foco desse estudo.

Ambos os sistemas (de visualização de KPIs e visualização de custos, construídos com modelos matemáticos no PI-AF® e respectivamente visualizados no PI Vision® e Power BI®) estão em utilização pela Operação e Gestão e já entraram em uma fase de aprimoramento, que serão melhor descritos adiante, no subitem Recomendações para Trabalhos Futuros.

O Sistema de Predição de Consumos pelo peso planejado (o terceiro Objetivo Específico descrito) também se mostrou aplicável para a previsibilidade do uso da água, vapor e energia de acordo com o planejamento de produção. Esse Sistema ainda não possui um bom índice de assertividade na previsão dos consumos versus produção prevista, e pode também ser aprimorado.

Adicionalmente, como esse Sistema possui uma métrica diferenciada na obtenção dos custos dos insumos em relação ao atualmente praticado, está em análise pelo grupo responsável do processo da unidade, e devido a este fator, será um dos pontos a serem descritos no capítulo de Recomendações e Trabalhos Futuros.

Não foi possível avaliar a replicação do framework idealizado, mas é factível que a adaptabilidade desse modelo seja compatível com outras tecnologias de captura de dados dos processos, de modelos de simulação de processos em sistemas cyber físicos, e de modelos de visualização.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme descrito anteriormente, existem alguns pontos de aprimoramento, que compõem a base do planejamento para trabalhos futuros, além de outros pontos de ajustes, como segue:

- a) Sistema de KPIs on line no PI Vision®
 - Para o KPI de consumo da Água: dinamização da tela dos principais consumidores da MP-16;

- Para o KPI de consumo de Vapor: mostrar na tela e criar dinâmizações dos principais consumidores da MP-16;
 - Para o KPI de consumo de Energia: mostrar na tela e criar dinâmizações dos principais consumidores de CD601, SE7, SE8 e SE9 da MP-16;
 - Geral: Desenvolver estudo e implementação para alimentação automática das novas curvas de geração de KPIs otimizados no PI-AF®;
- b) Sistema de custos da água, vapor e energia no Power BI®:
- Elaboração de atualização automática no navegador (Chrome®, Internet Explorer®, etc.) com os dados atualizados, pois mesmo que o Power BI® consiga trazer os dados a cada 30 minutos, se não houver atualização do navegador da internet, o usuário não tem a visualização atualizada;
 - Criação de visualização dos indicadores de custos associados a construção existente para efeito de adequação da Operação/Gestão;
 - Geral: Desenvolver estudo e implementação para alimentação automática das novas curvas de geração de KPIs otimizados no PI-AF®;
- c) Sistema de previsibilidade dos consumos de água, vapor e energia no Python®:
- Estudo e implantação da inserção da variável Tempo de Quebra nos modelos de correlação multivariável, para melhorar o grau de assertividade do modelo;
 - Criação de visualização dos indicadores de custos associados a construção existente para efeito de adequação da Operação/Gestão;

REFERÊNCIAS

- ADEOGUN, A. I.; BHAGAWATI, P. B.; SHIVAYOGIMATH, C. B. Pollutants removals and energy consumption in electrochemical cell for pulping processes wastewater treatment: Artificial neural network, response surface methodology and kinetic studies. *Journal of Environmental Management*, v. 281, 2021.
- ALHAMADI, M. Challenges, Strategies and Adaptations on Interactive Dashboards. *UMAP 2020 - Proceedings of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, p. 368–371, 2020.
- ARUMUGAM, A. Practices and technologies adopted by international pulp and paper mills to enhance environmental sustainability. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, v. 29, n. 1, p. 151–158, 2017.
- AVEVA. Administração do PI System: Versão 2018, SP3 Patch 2. Cambridge, UK: Disponível em: http://cdn.osisoft.com/learningcontent/pdfs/PISystemAdministratorForITProfessionalsWorkbook_Portuguese.pdf?_ga=2.216983062.1824511639.1553711944-1416083310.1545143833. Acesso em 10 Julho 2022.
- BACH, B. et al. Dashboard Design Patterns. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, p. 1–11, 2022.
- BARBELI, M. C. Gestão energética na indústria de papel e celulose no Brasil: perspectivas e potenciais de conservação de energia. UNIFIAN, AESA, FUNADESP, n. c, 2005. Disponível em https://simpep.feb.unesp.br/anais/anais_12/copiar.php?arquivo=Barbeli_MC_Gestao_energeticanai.pdf. Acesso em 17 setembro 2021
- BURGEL, E.; ANZANELLO, M. J. Abordagem para Seleção de Variáveis Preditivas no Contexto de Controle de Inventários. *Revista Gestão Industrial*, v. 14, n. 4, p. 154–195, 2018
- CAMPOS, E. DA S. Curso Básico de Fabricação de Celulose e Papel. Instituto Eucalyptus, n. revisão 01, p. 1–233, 2011. Disponível em https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2011_Curso_Fabricacao_Celulose_Papel.pdf. Acesso em 15 setembro 2021.
- CHEN, G. et al. The framework design of smart factory in discrete manufacturing industry based on cyber-physical system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 33, n. 1, p. 79–101, 2020.
- CINTAS, P. G.; ALMAGRO, L. M.; LLABRÉS, X. T.-M. *Industrial Statistics with Minitab*. 2o Edition ed. Barcelona Supercomputing Center, Spain: John Wiley and Sons Inc., v.1, p.247-254, 2012.
- CORCELLI, F. et al. Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp - A Finland case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 198, p. 96–111, 2018.

CORCELLI, F.; RIPA, M.; ULGIATI, S. Efficiency and sustainability indicators for papermaking from virgin pulp - An emergy-based case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 313–328, 2018.

DE CASTRO, L. N.; FERRARI, D. G. Introdução à mineração de dados: conceitos básicos, algoritmos e aplicações. Editora Saraiva ed. São Paulo/SP: [s.n.]. v. 1, p. 2016

DELOZIER, M. R.; ORLICH, S. Discovering influential cases in linear regression with MINITAB: Peeking into multidimensions with a MINITAB macro. *Statistical Methodology*, v. 2, n. 2, p. 71–81, 2005.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; MIGUEL, P. A. C. Uma análise distintiva entre o estudo de caso, a pesquisa-ação e a design science research. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, v. 17, n. 56, p. 1116–1133, 2015.

DOLNY, L. M. Redução de Efluente de água branca em uma máquina de papel. UFPR - Universidade Federal do Paraná, p. 1–138, 2011. Disponível em [https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/27615/R - D - DOLNY, LIDIO MIGUEL.pdf;jsessionid=4C6D248E44BA4ECCEFF609A6FCA669D5 ?sequence=1](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/27615/R-D-DOLNY,LIDIO%20MIGUEL.pdf;jsessionid=4C6D248E44BA4ECCEFF609A6FCA669D5?sequence=1). Acesso em 16 Setembro 2021.

FAO, 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture – Trends and challenges. Disponível em <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>. Acesso em: 27 julho 2022.

FERRARI, A.; RUSSO, M. *Introducing Microsoft Power BI*. Redmond, Washington: Microsoft Corporation / Microsoft Press, v.1, p. 10-15, 2016.

FEW, S. *Information Dashboard Design: Displaying Data For AT-A-Glance Monitoring*. O'Reilly Media, p. 246, 2006.

FILHO, CESAR DE ARAUJO GÓSS; LEITIS, G. A. *Revista O Papel*. Sistema de Vácuo na Secção de Formação da Folha de Papel, n. July, p. 57–61, 2013. Disponível em http://www.revistaopapel.org.br/noticiaanexos/1373897771_8edb81568b87706fd9e480fa4a6c5c89_946160675.pdf. Acesso em 18 setembro 2021.

GLATT, M. et al. Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 58, p. 231–245, 2021.

HENDRICKX, T. et al. Mining association rules in graphs based on frequent cohesive itemsets. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 9078, n. 3, p. 637–648, 2015.

ISA101, 2017. ISA - Boas práticas no desenvolvimento de aplicações Scada. Out/2017. Disponível em https://isasp.org.br/wp-content/uploads/2020/01/ISA_boas-praticas_SCADAPIMS-2017.pdf. Acesso em 20 Outubro 2022

JONES, D. et al. Characterizing the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 29, p. 36–52, 2020.

KAHLERT, T.; GIZA, K. Visual Studio Code - Code Editing. Redefined. v. 1 p-1-29, 2016.

KLABIN, 2022. A nossa essência, onde estamos – Unidades Klabin Disponível em <https://klabin.com.br/nossa-essencia/onde-estamos>. Acesso em: 15 outubro 2022.

KLABIN-OSISOFT, 2021. Klabin: Paper gets a Digital Twin. Disponível em <https://resources.osisoft.com/customer-stories/Klabin-PI-World-customer-story.pdf>. Acesso em 19 setembro 2021.

KRITZINGER, W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018.

LEE, J. et al. Industrial Big Data Analytics and Cyber-physical Systems for Future Maintenance & Service Innovation. Procedia CIRP, v. 38, p. 3–7, 2015.

LI, X. et al. Application of novel hybrid deep learning model for cleaner production in a paper industrial wastewater treatment system. Journal of Cleaner Production, v. 294, 2021.

MENGIST, W.; SOROMESSA, T.; LEGESE, G. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. MethodsX, v. 7, p. 100777, 2020.

MCKINNEY, W. Python para análise de dados. 2a Edição ed. São Paulo/SP: O'Reilly Media Inc., v.2, p.1-892, 2018.

NBR6493, 2019. ABNT NBR 6493 - Emprego de cores para tubulações industriais. Terceira edição. Rio de Janeiro/RJ.28 Novembro 2019. V.1 p. 1-9.

NETER, JOHN; WASSERMAN, WILLIAM; KUTNERH., M. Applied Linear Regression Models. First edit. Homewood, Illinois/USA: Richard D. Irwin, Inc., v.1 p.1-561, 1983.

OSISOFT. Building PI System Assets and Analytics with AF. Disponível em: <http://cdn.osisoft.com/learningcontent/pdfs/BuildingPISystemAssetsWorkbook.pdf>. Acesso em 18 Julho 2022.

OURWORLDINDATA, 2021. Water use and stress. Renewable freshwater resources per capita. Disponível em <https://ourworldindata.org/water-use-stress>. Acesso em 19 julho 2021.

PAWLOWSKI, L. et al. Planning a Power BI Enterprise Deployment. May 2020, p. 1–259, 2020.

PI_AF_SDK. The AF SDK Library reference. Disponível em <https://docs.osisoft.com/en-US/bundle/af-sdk/page/html/overview.htm>. Acesso em 15 outubro 2022

- PI_DATA LINK. The use of logical questions – PI Square Osisoft Company. Disponível em <https://pisquare.osisoft.com/s/question/0D51I00004UHITvSAL/using-if-then-else-as-filter-expression-pi-datalink>. Acesso em 19 outubro 2022.
- PSAROMMATIS, F. A generic methodology and a digital twin for zero defect manufacturing (ZDM) performance mapping towards design for ZDM. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 59, p. 507–521, 2021.
- PYTHON_GUI. The Python Standard Library. Disponível em <https://www.pysimplegui.org/en/latest/readme/>. Acesso em 14 outubro 2022.
- PYTHON_NET. The Python .NET integration. Disponível em <https://github.com/pythonnet/pythonnet>. Acesso em 14 outubro 2022.
- REED, S.; LÖFSTRAND, M.; ANDREWS, J. Modelling cycle for simulation digital twins. *Manufacturing Letters*, v. 28, p. 54–58, abr. 2021.
- SANTOS, AGUINALDO dos. Seleção do método de pesquisa: guia para pós graduando em design e áreas afins. 1ª Edição. Curitiba/PR. Editora Insight. 2018. 230p, 14-120
- SARAIVA, M. et al. Armazéns inteligentes com a aplicação de tecnologias RFID, WMS e MES em indústrias do ramo de papel. *Proceedings of the 11th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering. Anais. ABCM*, 2021.
- SHAO, G.; HELU, M. Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters*, v. 24, p. 105–107, 2020.
- SIEGEL, A. F. *Practical Business Statistics. Seventh Edition*. Seattle, USA: v.1, p. 5-15, 2016.
- SIERLA, S. et al. (2020). Towards semi-automatic generation of a steady state digital twin of a brownfield process plant. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(19), 1–21.
- SOUSA, J. C. L. et al. Remoção de cálcio de efluente de máquina de papel por precipitação/coprecipitação. *Tecnológica*, v. 15, n. 2, p. 62–66, 2011. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/261798173_Remocao_de_calcio_de_efluente_de_maquina_de_papel_por_precipitacaocoprecipitacao.pdf. Acesso em 15 setembro 2021.
- TAO, FEI. et al. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 12, p. 3935–3953, 2019.
- VALMET, 2021. Sustainable papermaking process with innovative Technologies. Disponível em <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/new-lines/>. Acesso em 16 setembro 2021.

WANG, Y. et al. Complex product manufacturing and operation and maintenance integration based on digital twin. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021.

YU, H. et al. Job Shop Scheduling Based on Digital Twin Technology: A Survey and an Intelligent Platform. *Complexity*, v. 2021, 2021.

ZHAO, P. et al. The Modeling and Using Strategy for the Digital Twin in Process Planning. *IEEE Access*, v. 8, p. 41229–41245, 2020.

APÊNDICE 1 – GERAÇÃO DE KPIS ATRAVÉS DOS CES, COM AUXÍLIO DO MINITAB®

1 – INTRODUÇÃO

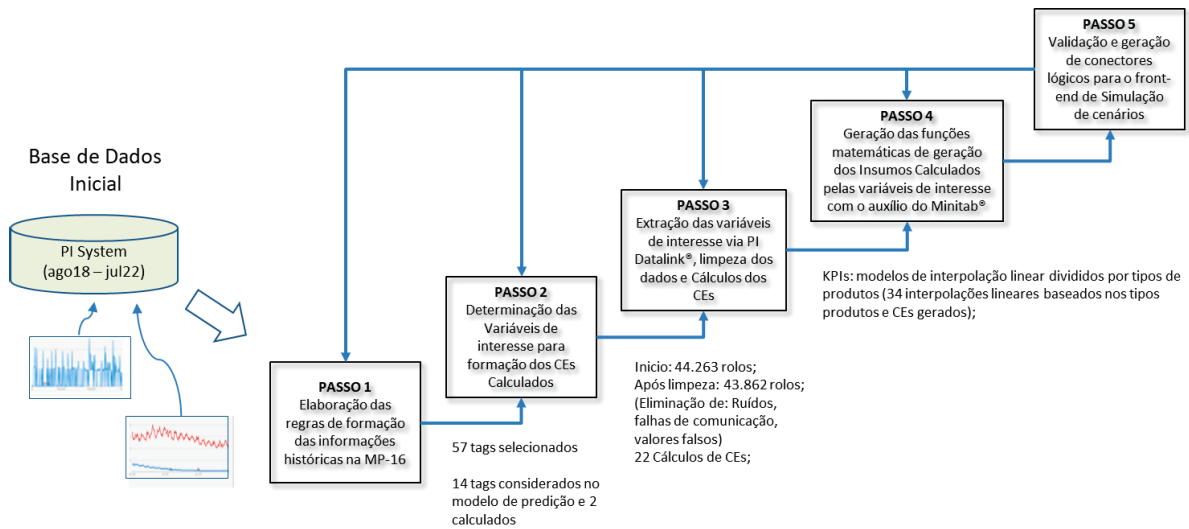
Este Apêndice tem por objetivo contextualizar a forma como os KPIs foram gerados através dos Consumos Específicos calculados pelas informações coletadas via PI Datalink®. Para tanto, os seguintes tópicos serão explanados:

- a) Contextualização da formação dos Consumos Específicos de Água, Vapor de baixa pressão, Vapor de média pressão, e Energia;
- b) Regras de formação das informações históricas de processo do Data Archive do PI System®, desde Ago/2018 até Jul/2022;
- c) Determinação das variáveis de interesse para geração dos Consumos Específicos;
- d) Extração das variáveis de interesse via PI Datalink®, limpeza dos dados e cálculos dos Consumos Específicos no módulo Excel® do PI Datalink®;
- e) Geração das funções matemáticas de geração dos KPIs em função dos CEs com o auxílio do Minitab®;
- f) Configuração das lógicas de seleção das funções matemáticas por tipo de produto para a geração do KPI unificado no PI-AF®;
- g) Geração de conectores lógicos para as telas do PI Vision® e Power BI® para a visualização dos KPIs por produto,

Os passos acima serão determinantes para a inteligência do Sistema, pois são baseados na extração dos dados que estão brutos (sem qualquer tratamento ou filtro, quanto à qualidade, ou qualquer outro tipo de estruturação), e irão compor a lógica para a determinação dos insumos (água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão e energia) através do peso planejado.

De acordo com De Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016), a definição do problema, seleção dos dados brutos, a definição da lógica (com os dados limpos, integrados, reduzidos, transformados e discretizados) e a aplicação do algoritmo, compõem a inteligência do Sistema. Em outras palavras, a partir da base de dados inicial (bruta), compõe-se a base de dados limpa, realiza-se um pré-processamento, mineração dos dados e a posterior validação, de acordo com a FIGURA 64 abaixo

FIGURA 64 –EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE P/ KPIS



FONTE: De Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016) e O Autor (2022).

2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS

Tipicamente falando, o consumo específico de um produto em determinado processo, pode ser medido pela relação entre o consumo médio do insumo e a produção realizada, conforme relação padrão a seguir:

$$CE = \frac{\text{consumo médio do insumo}}{\text{produção realizada}}$$

Essa relação normalmente é determinada em certa faixa de tempo (diária, mensal, por batelada, etc.), dando uma visão para a Operação e Gestão quanto a eficiência do processo (quanto menor o CE, melhor está a faixa de consumo do insumo). Para essa análise, adotou-se a utilização dos consumos e produções por rolo jumbo.

Para o estudo de caso desse Projeto, o CE da água consumida na MP-16 é dado pela relação a seguir, com dados extraídos do PI System®, armazenados no Data Archive:

$$CEA = \frac{\text{consumo total de água por rolo}}{\text{produção realizada por rolo}}$$

Onde:

- a) Consumo total de água por rolo: via 312FI-3423x (tag PI® calculado);
- b) Produção realizada por rolo: via UC-004x (tag PI® calculado);

Da mesma forma, o CE do vapor de baixa pressão na MP-16 é dado pela relação a seguir:

$$CEVB = \frac{\text{consumo total de VB por rolo}}{\text{produção realizada por rolo}}$$

Onde:

- a) Consumo total de VB por rolo: via 312FI-3452x (tag PI® calculado);
- b) Produção realizada por rolo: via UC-004x (tag PI® calculado);

O CE do Vapor de média pressão na MP-16 é dado pela relação a seguir:

$$CEVM = \frac{\text{consumo total de VM por rolo}}{\text{produção realizada por rolo}}$$

Onde:

- a) Consumo total de VM por rolo: via 312FI-3478x (tag PI® calculado);
- b) Produção realizada por rolo: via UC-004x (tag PI® calculado);

E finalmente, o CE da Energia na MP-16 é dado pela relação a seguir:

$$CEE = \frac{CD601 + SE7 + SE8 + SE9}{\text{produção realizada por rolo}}$$

Onde o consumo total de Energia é estabelecido pela seguinte relação:

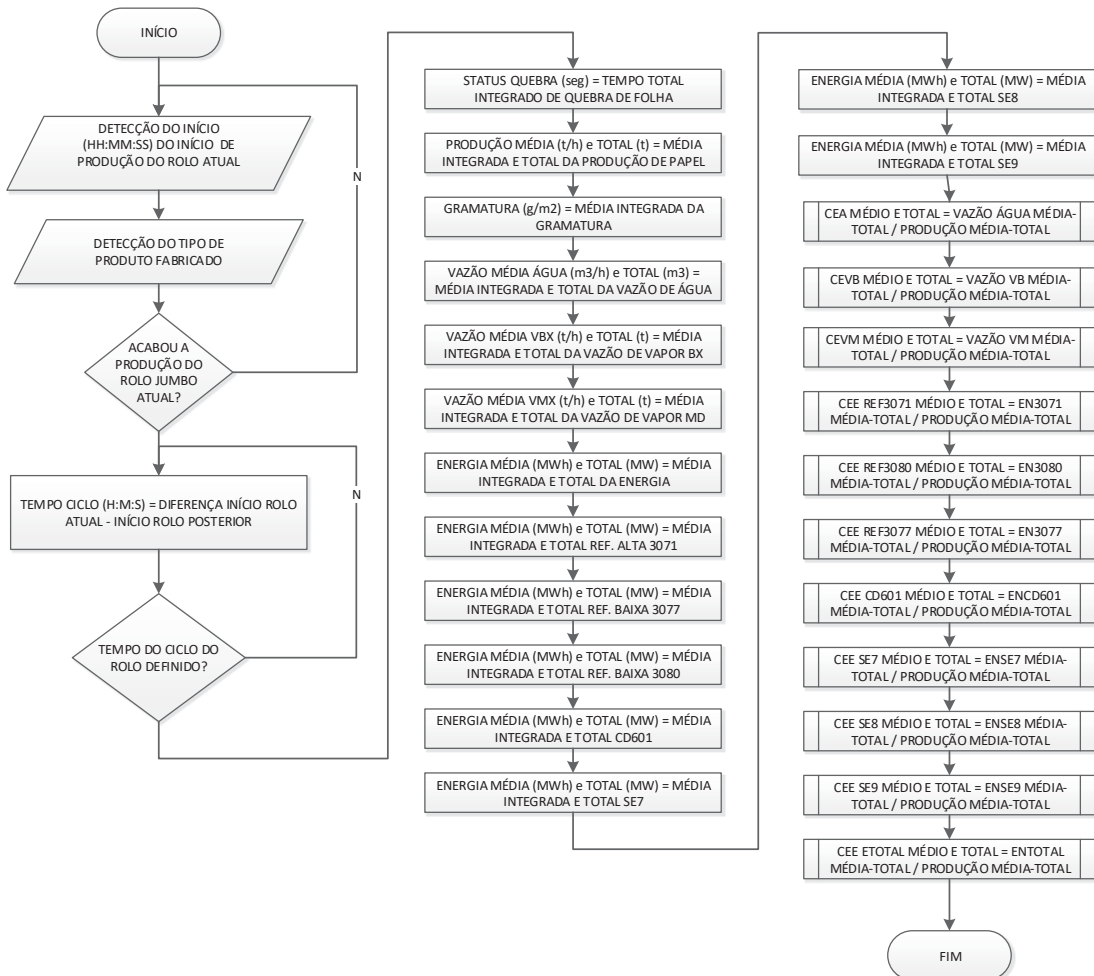
- a) Energia consumida no início do processo da MP-16 (Preparação de Massa): via CD601x (tag PI® calculado);
- b) Energia consumida na SE7, com diversas cargas associadas, dentre elas os Refinadores de Baixa Consistência (RBCs) na MP-16: via 757SE-0117Jx (tag PI® calculado);

- c) Energia consumida na SE8, com diversas cargas na MP-16: via 757SE-0120Jx (tag PI® calculado);
- d) Energia consumida na SE9, com diversas cargas associadas, dentre elas o Refinador de Alta Consistência (RAC) na MP-16: via 757SE-0014Jx (tag PI® calculado);

3 – METODOLOGIA DA EXTRAÇÃO DAS INFORMAÇÕES HISTÓRICAS

Foi utilizado o PI Datalink® (módulo do PI System®) para realizar a extração das informações históricas do Processo, que são a base da formação da inteligência que compõem o Sistema de geração de KPIs e também do modelo de Predição desse Projeto. A FIGURA 65 abaixo representa a lógica para a extração dos dados históricos coletados do Data Archive:

FIGURA 65 –EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE



FONTE: O Autor (2022).

Observar no fluxograma que não é viável a utilização dos tags como estão disponíveis no Data Archive (são dados originalmente brutos, com a leitura dinâmica das variáveis de suas origens – DCS, PLCs, etc.), uma vez que são medições instantâneas de vazões, flags de quebra, etc., onde foi realizado um condicionamento definido por Rolo Jumbo, de acordo com a lógica proposta no fluxograma.

Essa proposta de extração dos dados históricos das variáveis de interesse trouxe uma visão diferenciada da utilização da água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão, e energia, além do montante de produção.

4 – VARIÁVEIS DE INTERESSE DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS

Com a utilização dos tags de interesse listados abaixo e a utilização da lógica de formação das informações no fluxograma, foi possível a extração dos consumos de insumos (água, vapor e energia, além de outras variáveis que serão utilizadas em outras análises) por rolo jumbo.

Dessa forma, as seguintes tags no PI® foram considerados de interesse para a composição dos KPIs:

- a) Vazão de água, em m³/h;
- b) Vazão de VB, em t/h;
- c) Vazão de VM, em t/h;
- d) Energia consumida em CD601, em MW;
- e) Energia consumida na SE7, em MW;
- f) Energia consumida na SE8, em MW;
- g) Energia consumida na SE9, em MW;
- h) Energia consumida no RAC (REF3071), em MW;
- i) Energia consumida no RBC1 (RBC3077), em KW;
- j) Energia consumida no RBC2 (RBC3080), em KW;
- k) Produção, em ton;
- l) Status Quebra da folha = “quebra”;
- m) Código ou tipo do produto;
- n) ID do Rolo;

5 – CÁLCULOS DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS NO PI DATALINK®

Com os dados calculados por rolo jumbo, foi possível a realização dos cálculos para a obtenção dos consumos específicos (também por rolo jumbo). Esses cálculos foram realizados na interface Excel® do usuário, com a conexão via PI Datalink®, realizando as funções matemáticas definidas no item “Contextualização dos Consumos Específicos”, descritos nesse Apêndice.

6 – GERAÇÃO DAS FUNÇÕES MATEMÁTICAS DOS KPIS COM AUXÍLIO DO MINITAB®

Com a ajuda do Minitab®, conseguiu-se agrupar por produto os consumos específicos, onde as seguintes informações foram geradas:

- a) Frequência Total (contagem dos valores amostrados);
- b) Média (média dos valores amostrados);
- c) DesvPad (Desvio Padrão dos valores amostrados);
- d) Min (valores mínimos registrados dos valores amostrados);
- e) Mediana (mediana dos valores amostrados);
- f) Max (valores máximos registrados dos valores amostrados);

7 – LÓGICAS DE SELEÇÃO DAS FUNÇÕES MATEMÁTICAS POR PRODUTO

Com os agrupamentos de informações geradas, foi possível a determinação dos valores de consumos de água, vapor de baixa, vapor de média, e energia, mais comuns durante o ciclo produtivo e atribuí-los à um valor de referência.

Para a obtenção da relação entre o valor de referência citado anteriormente de 8.25 (média entre 6.5 e 10.0 na escala dos valores KPIs bons), foram consideradas as medianas agrupadas por tipo de produto, para que aconteça um maior peso dos melhores resultados de consumos na análise.

Também se considerou a relação de interpolação positiva com variação de 15% (KPI = 10.0, valor da mediana do CE acrescido em 15%), a variação negativa de 15% (KPI = 6.5, valor da mediana do CE diminuído em 15%), e o valor nulo de CE.

Para a obtenção dos KPIs, entende-se que a relação de dependência é diretamente proporcional, porém em relação inversa (quanto maior o CE, pior será o KPI, e quanto menor o CE, melhor para o processo), através da seguinte relação:

$$KPI = CEa + b$$

Para a obtenção das variáveis “a” e “b”, o método dos mínimos quadrados foi utilizado. A análise de regressão é uma ferramenta estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis quantitativas para que uma variável possa ser predita em função da outra. Mais frequentemente, a forma funcional da equação de regressão não é conhecida em avanço e deve ser decidida quando os dados são coletados e analisados. Assim, frequentemente, uma função linear ou quadrática é frequentemente usada de forma satisfatória como primeira aproximação da função de regressão. NETER, JOHN; WASSERMAN, WILLIAM; KUTNERH., M. (1983).

Várias técnicas de estatísticas de diagnóstico foram propostas para ajudar a identificar casos que afetam acentuadamente ou de certa forma influenciam as características de um modelo de regressão linear ajustado. Uma vez encontrados casos nessa linha, decisões podem ser feitas ao seu valor no processo de construção do modelo ideal. DELOZIER, M. R.; ORLICH, S. (2005).

Com os resultados obtidos dos CEs (x), foi possível a obtenção das variáveis “a” e “b” por tipo de produto. A FIGURA 66 abaixo mostra esses resultados para a Água, como exemplo:

FIGURA 66 – VALORES “a” e “b” PARA A ÁGUA

b_Comum	a_TOT
19.91667	-0.69009
19.91667	-0.63371
19.91667	-0.66329
19.91667	-0.60004
19.91667	-0.52529
19.91667	-0.51140
19.91667	-0.61611
19.91667	-0.63049
19.91667	-0.69739
19.91667	-0.69329
19.91667	-0.59448
19.91667	-0.65850
19.91667	-0.73214
19.91667	-0.72762
19.91667	-0.75249
19.91667	-0.80272
19.91667	-0.72644
19.91667	-0.59339
19.91667	-0.69300
19.91667	-0.69544
19.91667	-0.74566
19.91667	-0.57474
19.91667	-0.79582
19.91667	-0.73251
19.91667	-0.74892
19.91667	-0.82096
19.91667	-0.74786
19.91667	-0.78137
19.91667	-0.68571
19.91667	-0.76084
19.91667	-0.79462
19.91667	-0.75797
19.91667	-0.91317
19.91667	-0.58579
19.91667	-0.78984
19.91667	-0.65988

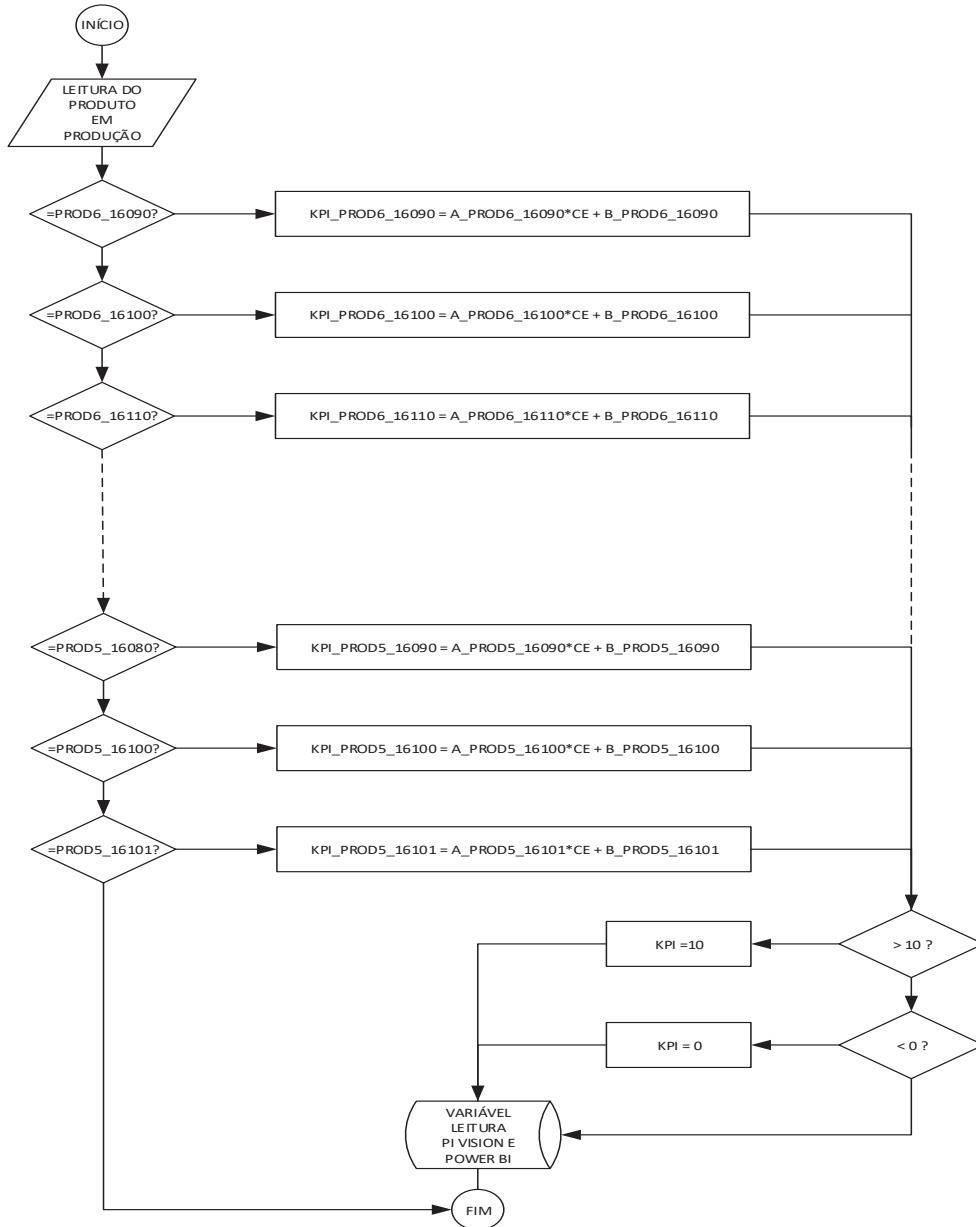
FONTE: O Autor (2022).

Esses valores foram alimentados em uma tabela dinâmica dentro do PI AF®, que apontam para os atributos específicos de cada Produto, que por sua vez entram no cálculo do PI Analysys. Com essa estratégia, em qualquer eventualidade de novos cálculos, ficará mais fácil realizar a troca das variáveis, simplesmente copiando os

novos valores de “a” e “b” no módulo Excel® do PI Datalink® para dentro do PI AF® (esse tema será explorado no capítulo das Discussões e Conclusões).

A seguinte lógica foi então estabelecida, por padrão, para a definição dos KPIs de consumos da água, vapor e energia da MP-16, como segue, na FIGURA 67:

FIGURA 67 – LÓGICA SELEÇÃO FUNÇÃO KPI x CE POR PRODUTO



FONTE: O Autor (2022).

Para a realização da função de relacionamento entre os consumos específicos e os indicadores de processos, algumas premissas foram adotadas:

- a) O índice medido entre 0.0 e 3.5 é considerado ruim;

- b) O índice medido entre 3.5 e 6.5 é considerado como sinal de atenção;
- c) O índice medido entre 6.5 e 10.0 é considerado bom;
- d) O valor de 8.25 (média entre 6.5 e 10.0) foi utilizado como referência, estabelecendo uma relação direta entre os CEs e os KPIs.

Como premissas para a construção dos KPIs:

- a) Não existe KPI negativo, então o limite mínimo para a equação acima é 0.0 (zero);
- b) Não existe KPI maior que 10.0 (dez), limitando-se a relação acima deste valor máximo;
- c) Quando a máquina de papel está parada (Produção = 0.0), o KPI fica no seu último valor;

Como resultado, foram geradas lógicas que foram alimentadas no módulo PI Analytics no PI AF® para a seleção das funções, que fazem a seleção do cálculo do KPIS, independentemente do Produto.

8 – GERAÇÃO DE CONECTORES LÓGICOS PARA PI VISION® E POWER BI®

Após a geração das funções lógicas no PI Analytics, foram gerados tags lógicos no PI AF®. Esses tags lógicos são referenciados no PI Vision®, para a disponibilização da informação ao usuário, e ao mesmo tempo são direcionados para o Power BI®, e assim, os seguintes tags e KPIs foram disponibilizados, conforme FIGURA 68 abaixo, extraídos do PI AF®, para a Água, como exemplo:

FIGURA 68 – KPI CONSUMO DA ÁGUA DO ROLO ATUAL

👉	👉 KPIa Tot Rolo Atu	8.9874	1/10/2023 1:26:55 AM	Double
👉	👉 Rolo Atu CEA	15.764	1/10/2023 1:26:55 AM	Double
	👉 Rolo Atu Tempo	38.55 min	1/10/2023 1:27:23 AM	Double
	👉 Rolo Atu Tot Água	148.96 m3	1/10/2023 1:27:20 AM	Single
	👉 Timestamp per Rolo Atu	1/10/2023 1:27:23 AM	1/10/2023 1:27:23 AM	DateTime
	👉 Timestamp trig Rolo Atu	1/10/2023 12:48:49 AM	1/10/2023 12:48:49 AM	DateTime

FONTE: O Autor (2022).

APÊNDICE 2 – GERAÇÃO DOS INSUMOS CALCULADOS COM O AUXÍLIO DO MINITAB®

1 – INTRODUÇÃO

Este Apêndice tem por objetivo contextualizar a forma como os consumos previstos de água, vapor e média, vapor de baixa, e energia, são gerados através do peso planejado pelas informações coletadas via PI Datalink®, com o auxílio do Minitab®.

Para tanto, os seguintes tópicos serão explanados:

- a) Contextualização dos consumos calculados;
- b) Regras de formação das informações históricas de processo do Data Archive do PI System®, desde Ago/2018 até Jul/2022;
- c) Determinação das variáveis de interesse para geração dos Pesos calculados;
- d) Extração das variáveis de interesse via PI Datalink®, limpeza dos dados e cálculos das integrações no módulo Excel® do PI Datalink®;
- e) Geração das funções matemáticas de geração dos Pesos calculados em função das variáveis de interesse com o auxílio do Minitab®;
- f) Configuração das funções matemáticas por tipo de produto para a geração dos consumos calculados no PI-AF®;
- g) Geração de conectores lógicos para o módulo de simulação,

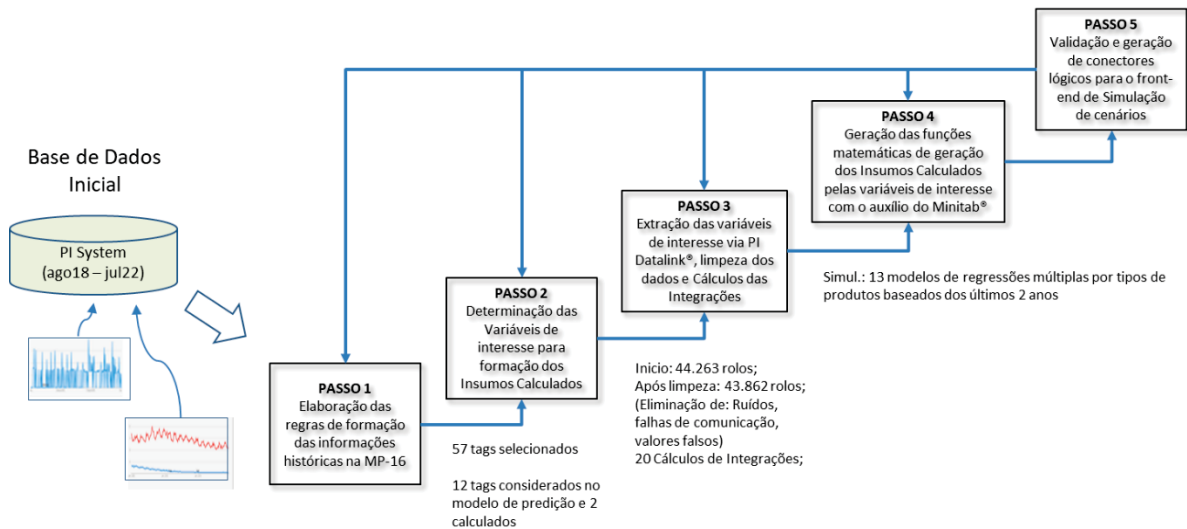
Os passos acima serão determinantes para a inteligência do Sistema, pois são baseados na extração dos dados que estão brutos (sem qualquer tratamento ou filtro, quanto à qualidade, ou qualquer outro tipo de estruturação), e irão compor a lógica para a determinação dos insumos (água, vapor de baixa, vapor de média e energia) através do peso planejado.

De acordo com De Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016), a definição do problema, seleção dos dados brutos, a definição da lógica (com os dados limpos, integrados, reduzidos, transformados e discretizados) e a aplicação do algoritmo compõem a inteligência do Sistema. Em outras palavras, a partir da base de dados

inicial (bruta), compõe-se a base de dados limpa, realiza-se um pré-processamento, mineração dos dados e a posterior validação.

A FIGURA 69 abaixo mostra a metodologia adotada, em forma de blocos e simplificada, por passos, distinguindo as etapas do processo de acordo com as tecnologias e necessidades:

FIGURA 69 – FLUXOGRAMA DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE P/ PESOS CALCULADOS



FONTE: De Castro, L. N.; Ferrari, D. G. (2016) e O Autor (2022).

2 – CONTEXTUALIZAÇÃO DOS CALCULOS DOS INSUMOS

Os consumos calculados dos insumos foram dimensionados por duas vertentes:

- O conhecimento da Operação: após uma fase de entrevistas com o pessoal de Gestão da MP-16;
- O estudo realizado no Apêndice 3 desse trabalho;

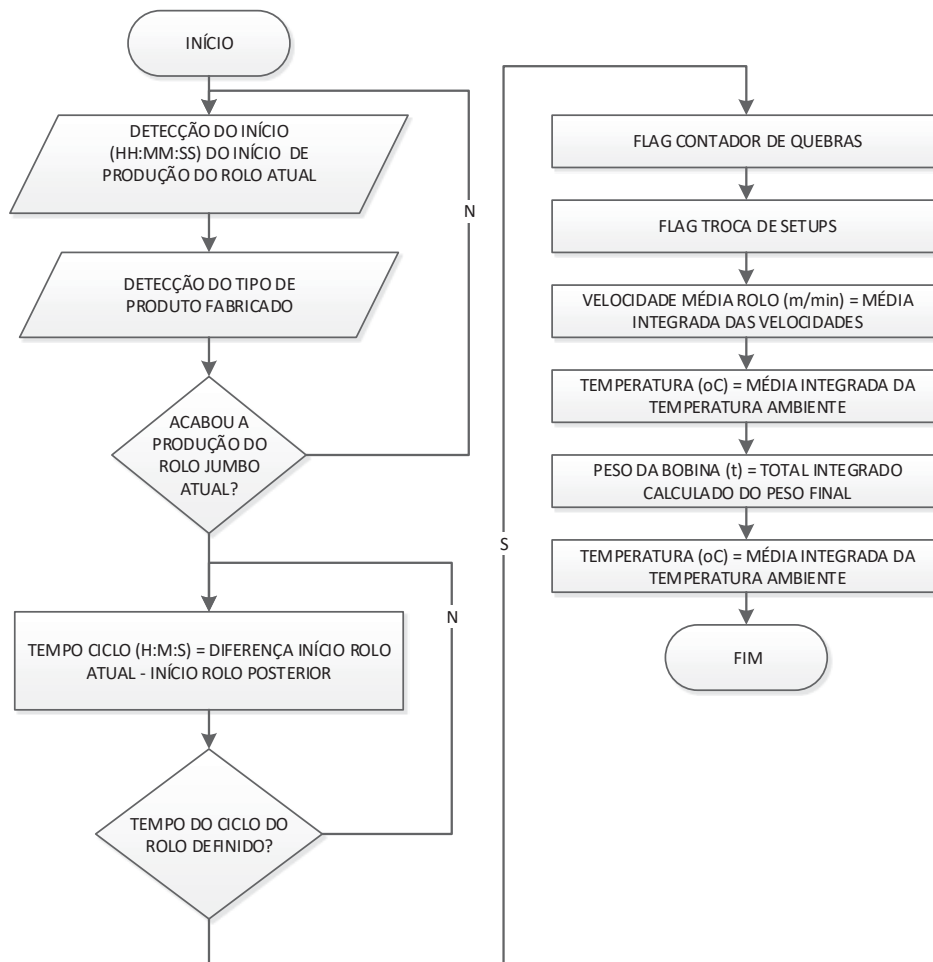
Pressupõe-se assim, que o consumo de insumos no processo possui variáveis de processo que, direta ou indiretamente, contribuem para que a MP-16 tenha um consumo maior ou menor desses insumos.

Com essa visão integrada, foi possível determinar quais seriam as variáveis de interesse propostas para a formação da modelagem, bem como a composição dos produtos de interesse.

3 – METODOLOGIA DA EXTRAÇÃO DAS INFORMAÇÕES HISTÓRICAS

Assim como foi realizado para a extração dos valores históricos para o cálculo dos KPIs, também foi utilizado o PI Datalink® (módulo do PI System®) para realização da extração das informações históricas do Processo, que são a base da formação da inteligência que compõem o Sistema de geração do modelo de Predição desse Projeto. A FIGURA 70 abaixo representa a lógica para a extração desses dados históricos coletados do Data Archive.

FIGURA 70 – FLUXOGRAMA DE EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES DO DATA ARCHIVE P/ MODELO DE PREDIÇÃO



FONTE: O Autor (2022).

Observar no fluxograma que não é viável a utilização dos tags como estão disponíveis no Data Archive (são dados originalmente brutos, com a leitura dinâmica

das variáveis de suas origens – DCS, PLCs, etc.), uma vez que são medições instantâneas de vazões, flags de quebra, etc., onde foi realizado um condicionamento definido por Rolo Jumbo, de acordo com a lógica proposta no fluxograma.

Essa proposta de extração dos dados históricos das variáveis de interesse trouxe uma visão diferenciada da utilização da água, vapor de baixa, vapor de média, e energia, entre outras informações importantes para a realização dos cálculos.

4 – VARIÁVEIS DE INTERESSE DOS MODELOS DE PREDIÇÃO

Com a utilização dos tags de interesse listados abaixo e a utilização da lógica de formação das informações no fluxograma, foi possível a extração das variáveis que serão utilizadas nesta análise.

Dessa forma, os seguintes tags no PI® foram considerados de interesse para a composição do Sistema de Predição de Consumos de Insumos:

- a) Status Quebra da folha = “quebra”;
- b) Código ou tipo do produto;
- c) Velocidade instantânea, em m/min;
- d) Peso da bobina calculado, em ton;
- e) Temperatura ambiente em °C;
- f) Vazão de água, em m³/h;
- g) Vazão de VB, em t/h;
- h) Vazão de VM, em t/h;
- i) Energia consumida em CD601, em MW;
- j) Energia consumida na SE7, em MW;
- k) Energia consumida na SE8, em MW;
- l) Energia consumida na SE9, em MW;

5 – CÁLCULO DAS INTEGRAÇÕES DOS MODELO DE PREDIÇÃO

Tendo como base que o modelo de predição dos insumos é calculado através de diversas variáveis através de um modelo estatístico, entende-se que a maioria das análises é multivariada por natureza, e a dificuldade em realizar pesquisas complexas com análises compostas por apenas uma variável contribui para que os métodos multivariados sejam amplamente utilizados. BURGEL, E.; ANZANELLO, M. J. (2018)

Com os dados calculados por rolo jumbo, foi possível a realização dos cálculos para a obtenção do montante e médias de consumos diários de insumos. Esses cálculos foram realizados na interface Excel® do usuário, com a conexão via PI Datalink®, realizando as funções matemáticas definidas no item “Contextualização dos Cálculos dos Insumos”, descritos nesse Apêndice.

Pelo ponto de vista da função matemática que atenderia a relação entre múltiplas variáveis com o peso final calculado por período, atribui-se mais de uma variável com a referida predição, que por si só não seriam possíveis com a quantidade de informações geradas por rolo jumbo.

Dessa forma, as informações geradas (43.862 rolos) foram reduzidas para uma taxa diária calculada por produto, através de cálculos dinâmicos no módulo Excel® do PI Datalink®, da seguinte forma, conforme QUADRO 3 abaixo:

QUADRO 3 – METODOLOGIA DE REDUÇÃO DOS DADOS HISTÓRICOS POR PRODUTO

Taxa diária de leitura dos dados	Metodologia
Velocidade Média (m/min)	Média
Peso da bobina (ton)	Totalizado
Temperatura ambiente (°C)	Média
Consumo de Água (m ³)	Total
Consumo de Vapor de Média (ton)	Total
Consumo de Vapor de Baixa (ton)	Total
Consumo de Energia Total (MW)	Total
Coefficiente de Quebras	Índice entre 0 e 1
Coefficiente de Troca de Setups	Índice entre 0 e 1

FONTE: O Autor (2022).

Para a determinação das taxas de quebras e de setups, as relações a seguir foram determinadas

$$\text{Coef. Quebras por dia e produto} = \frac{\text{Quantidade de Quebras por dia e Produto}}{\text{Quantidade total de bobinas produzidas}}$$

$$\text{Coef. Troca de Setups por dia e produto} = \frac{\text{Quantidade de Setups por dia e Produto}}{\text{Quantidade total de bobinas produzidas}}$$

Para a realização desses cálculos, foi utilizado a função de campo calculado na tabela dinâmica do módulo do Excel® do PI Datalink®, com as variáveis contadas de quebras por produto e troca de setups. A FIGURA 71 abaixo mostra um fragmento de uma análise realizada para um dos produtos fabricados na MP-16:

FIGURA 71 – FRAGMENTO DE UMA REDUÇÃO DE DADOS

DATA	TROCA DE SETUPS	QUEBRAS	BOBINAS PRODUZIDAS	VELOCIDADE DE MÉDIA (m/min)	PESO MÉDIO DA BOBINA (ton)	TEMP. AMBIENTE MÉDIA (°C)	ÁGUA TOTAL (m3)	VAPOR de BAIXA TOTAL (ton)	VAPOR de MÉDIA TOTAL (ton)	ENERGIA TOTAL (MWh)	COEF. TROCA SETUPS	COEF. QUEBRAS
16/05/2022	0	2	10	693.134	84.827	10.273	1568.886	154.868	87.159	91.612	0.000	0.200
23/12/2020	0	0	3	739.079	36.957	17.431	366.137	37.977	16.682	27.271	0.000	0.000
22/12/2020	0	0	21	741.994	220.979	21.610	4998.595	401.574	181.159	288.597	0.000	0.000
21/12/2020	0	1	4	716.109	46.119	26.142	1280.330	96.584	45.434	70.749	0.000	0.250
04/08/2020	0	1	18	691.760	205.423	14.617	4909.176	458.560	143.956	261.580	0.000	0.056
03/08/2020	0	0	11	739.393	134.934	19.578	2939.512	343.798	47.451	176.710	0.000	0.000
06/07/2020	0	0	3	722.405	38.678	13.963	368.588	33.746	14.184	20.656	0.000	0.000
05/07/2020	0	0	27	722.023	334.220	12.651	6908.626	621.494	256.305	388.894	0.000	0.000
04/07/2020	0	2	23	679.295	271.554	9.925	6369.491	572.276	241.378	335.084	0.000	0.087
11/06/2020	0	0	9	756.241	114.290	15.232	2007.919	185.880	82.658	115.163	0.000	0.000
10/06/2020	0	2	25	723.423	303.549	14.939	7285.584	569.006	257.629	342.819	0.000	0.080
09/06/2020	0	0	26	744.440	334.791	15.421	6936.594	561.191	260.795	385.940	0.000	0.000

FONTE: O Autor (2022).

Foram gerados cálculos de integrações, gerando-se 20 tabelas de dados como o exemplo da FIGURA 83 acima, para os 20 produtos mais fabricados nos últimos 2 anos, obtendo-se amostras de 1022 dias até 4 dias, por tipo de produto.

6 – CÁLCULO DOS CONSUMOS DE INSUMOS COM A AJUDA DO MINITAB®

Com a ajuda do Minitab®, e carregando as tabelas de dados reduzidas via módulo Assistência/Regressão/Regressão Múltipla, foram geradas as funções matemáticas com 5 variáveis (X1 = Coeficiente de troca de setups, X2 = Coeficiente de quebras, X3 = Velocidade média, X4 = Peso médio da bobina, X5 = Temperatura ambiente), para a MP-16, com as seguintes possibilidades de resposta:

- Predição do consumo de água;
- Predição do consumo de vapor de média;
- Predição do consumo de vapor de baixa;
- Predição do consumo de energia;

Os resultados foram avaliados de acordo com as respostas obtidas pelo Minitab® (CINTAS, P. G.; ALMAGRO, L. M.; LLABRÉS, X. T. M. (2012)), quanto a determinação do R², fator P e outros determinantes nessa análise estatística, de acordo com Neter, John; Wasserman, William; Kutnerrh., M. (1983) com as determinações das constantes (Xi) e parâmetros (β_l) e termos independentes (ε_l)

de acordo com a função típica abaixo, para a determinação dos cálculos de interesse do modelo de correlação multivariável:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_n X_n + \varepsilon_i$$

Ainda de acordo com Neter, John; Wasserman, William; Kutner, M. (1983), a função gerada do modelo de regressão depende da quantidade e qualidade das variáveis de interesse (neste caso, no número de amostras ou dias com cálculos integrados de consumos dos insumos água, vapor de baixa pressão, vapor de média pressão, e energia). As funções geradas em uma primeira análise trouxeram alguns resultados nulos (pela quantidade insuficiente de amostras) e alguns resultados inválidos (pela qualidade dos dados das amostras), o que provocou a limpeza de outliers da análise, gerando as funções finais e corrigidas, que por fim, gerou as correlações multivariáveis (52 no total) desejadas neste Projeto.

7 –GERAÇÃO DOS CONECTORES LÓGICOS

Após a criação das funções matemáticas com as variáveis X1 = Coeficiente de troca de setups, X2 = Coeficiente de quebras, X3 = Velocidade média, X4 = Peso médio da bobina, X5 = Temperatura ambiente, para os resultados determinados (Y = Água total, ou Y=Vapor de média pressão total, ou Y = Vapor de baixa pressão total, ou Y = Energia total, o PI Analysis, com a geração de uma função determinada para cada função gerada, conforme exemplo da FIGURA 72 abaixo:

FIGURA 72 – FUNÇÕES NO PI ANALYSIS (EXEMPLO)

Name	Expression	Output Attribute	
Agua	261+152922*'X1_SLF16110'+1268*'X2_SLF16110'-1.510*'X3_SLF16110'+2.01*'X4'+119.5*'X5_SLF16110'+0.00530*	Água SLF16110 Calc	⊗
<p>261 +152922*'X1_SLF16110'+1268*'X2_SLF16110'-1.510*'X3_SLF16110'+2.01*'X4'+119.5*'X5_SLF16110'+0.00530*'X4'^2-4.36*'X5_SLF16110'^2 -180981*'X1_SLF16110'*'X2_SLF16110'-177.2*'X1_SLF16110'*'X3_SLF16110'-3388*'X1_SLF16110'*'X5_SLF16110'+0.5966*'X4'*'X5_SLF16110'</p>			
VaporBx	-554+9391*'X1_SLF16110'+23.3*'X2_SLF16110'+1.89*'X3_SLF16110'+0.3275*'X4'+12.84*'X5_SLF16110'-31608*'X	Vapor Bx SLF16110 Calc	⊗
VaporMd	-52.4-3531*'X1_SLF16110'+54.4*'X2_SLF16110'+0.0138*'X3_SLF16110'+0.1289*'X4'+8.49*'X5_SLF16110'-0.3126	Vapor Md SLF16110 Calc	⊗
EnergiaCalc	-20.7-1536*'X1_SLF16110'+26.9*'X2_SLF16110'-0.0153*'X3_SLF16110'+0.0125*'X4'+5.68*'X5_SLF16110'-0.2051	Energia SLF16110 Calc	⊗

FONTE: O Autor (2022).

APÊNDICE 3 – FRAGMENTO DO TRABALHO DE ANÁLISE TAGUCHI PARA AS VARIÁVEIS DE INTERESSE DESSE PROJETO

Apêndice criado a partir de fragmento como requisito parcial para conclusão da Disciplina Planejamento na Manufatura – 1º Trimestre de 2021 – Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortes e Prof. Dr. Gustavo Bavaresco Sucharski.

47

Como análise complementar, podem-se observar os valores-P abaixo de 0,3 (Taxa de confiança ajustada para o experimento = 70%). Assim, para a análise em vermelho no gráfico acima, rejeita H_0 $P\text{-value} < 0,3$.

- Tabela de Resposta para as Médias

TABELA 10 – TABELA DE RESPOSTA PARA AS MÉDIAS NA MP-16 (ANÁLISE TAGUCHI)

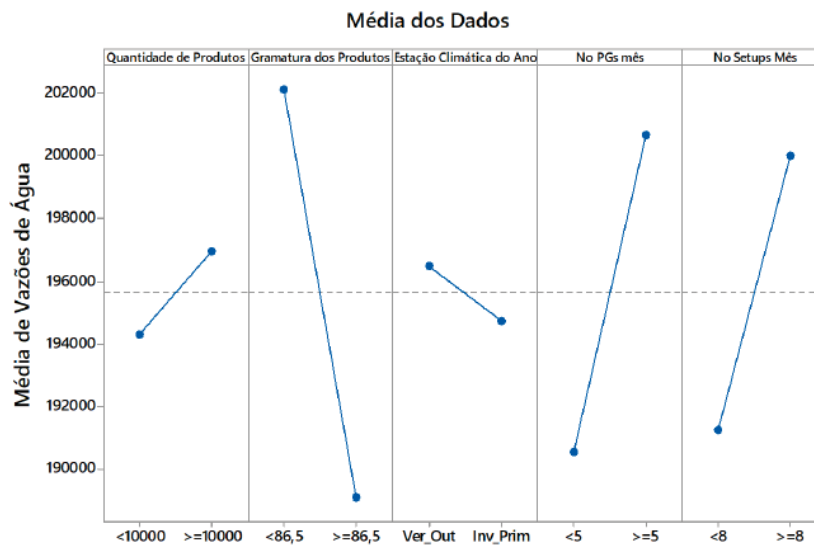
Nível	Qtade de Produtos	Gramatura dos Produtos	Estação Climática do Ano	PGs no Mês	Setups no Mês
1	194290	202126	196485	190541	191240
2	196938	189103	194743	200688	199989
Delta	2648	13023	1742	10146	8748
Atribuir Postos	4	1	5	2	3

FONTE: O autor (2021).

Pela análise Taguchi realizada acima, os três fatores de maior relevância, na ordem, que contribuem para a otimização do uso da água na MP16, são: Gramatura, PGs no Mês, Setups no Mês, o que faz todo o sentido.

Podemos observar a análise acima, pelo gráfico de efeitos:

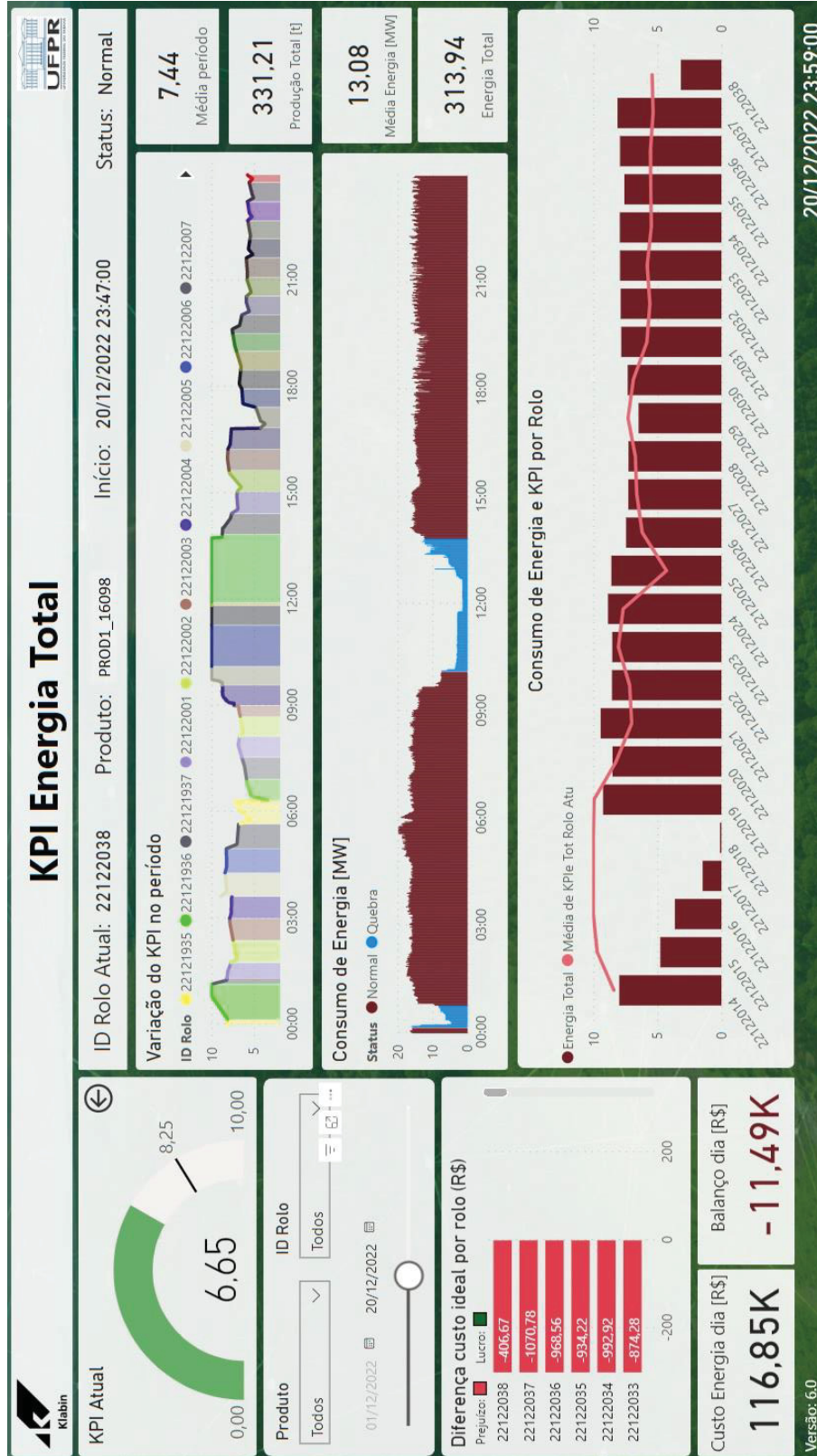
GRÁFICO 3 – EFEITOS PRINCIPAIS DAS MÉDIAS (MP-16)



FONTE: O autor (2021).

APÊNDICE 4 – TELA ENERGIA TOTAL NO POWER BI®

FIGURA 73 –TELA ENERGIA TOTAL NO POWER BI®



FONTE: O Autor (2022).