

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** Centro Tecnológico  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# Automação e Gestão dos Sistemas de Segurança de uma Caldeira de Recuperação

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação da disciplina:  
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

*Elói Myszka Júnior*

*Florianópolis, Julho de 2019*



# Automação e Gestão dos Sistemas de Segurança de uma Caldeira de Recuperação

*Elói Myszka Júnior*

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina  
**DAS 5511: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovada na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

*Prof. Hector Bessa Silveira*

---



Banca Examinadora:

Juliana Cristina dos Santos  
Orientador na Empresa

Prof. Hector Bessa Silveira  
Orientador no Curso

Prof. Hector Bessa Silveira  
Responsável pela disciplina

Rodrigo Gesser, Avaliador

Igor Medeiros Benincá, Debatedor

Gabriel Ratto Goulart, Debatedor



*Aos meus pais Elói e Rosicléa, meu irmão João Paulo,  
minha avó Claudemira e meu avô Cassemiro (in memoriam),  
exemplos de perseverança e superação de desafios*



# Agradecimentos

Agradeço ao meu professor orientador Hector Bessa Silveira, pelo auxílio na resolução dos desafios propostos, transmitindo seus conhecimentos.

À orientadora na WestRock, por se mostrar apto a me recepcionar na empresa e disponibilizar amplo conhecimento sobre a indústria de papel e celulose.

À coordenadora de recuperação, pelos ensinamentos técnicos transmitidos sobre a área.

Aos colegas de trabalho do Departamento de Recuperação e Utilidades, pelo apoio, experiência e orientação.

Aos colegas do Departamento de Instrumentação, em especial o Odirlei Ventura e Jocimar, por me acompanharem e auxiliarem em todo processo de implementação do projeto.

Aos operadores e assistentes da Caldeira de Recuperação, pelos conhecimentos práticos sobre o processo e operação do sistema.

Aos meus pais, Elói e Rosicléa, pelo apoio incondicional.

Ao meu companheiro, Gabriel, pelo auxílio e sugestões na confecção desse documento.

À WestRock por disponibilizar amplo acesso a todas as ferramentas utilizadas nesse projeto e a toda a infraestrutura da fábrica.

Muito obrigado.



*“A vida, em seus métodos, diz calma”  
(Di Melo)*



# Resumo

A Westrock é uma empresa verticalizada que produz embalagens personalizadas e atua no plantio de árvores, produção de papel e confecção de embalagens. Em sua fábrica de papel, localizada em Três Barras – SC, é utilizado o processo Kraft de produção de celulose. Para tornar esse processo economicamente viável, é necessária a recuperação dos produtos químicos utilizados. A Caldeira de Recuperação é o principal equipamento do ciclo de recuperação. Nela, ocorre a degradação dos compostos orgânicos, a redução do sulfato de sódio em sulfeto de sódio e a produção de vapor. Por ser um instrumento essencial para a continuidade do processo produtivo e por operar sob elevada pressão de vapor, a Caldeira de Recuperação necessita de um sistema de segurança altamente confiável. Dessa forma, torna-se possível reduzir as paradas emergenciais ou possíveis acidentes com o equipamento. Na WestRock, a Caldeira de Recuperação representa 12 % do orçamento anual de manutenção. Entretanto, seus sistemas de segurança possuem grandes problemas de confiabilidade. Entre os problemas enfrentados, situam-se: a dificuldade na comunicação entre a equipe de Operação e Supervisão, a ausência de informações no sistema supervisório e a subutilização do sistema de alarmes. No sistema de alarmes, há um excesso de ocorrências, uma vez que, diariamente, ocorrem em média 3.398 alarmes. Além disso, as nomenclaturas utilizadas e a falta de priorização dos alarmes dificultam o entendimento do problema e o escalonamento das ações a serem tomadas pelo operador para a resolução dos problemas no equipamento. Nesse contexto, este projeto tem como objetivo gerenciar e automatizar o sistema de segurança atual, de maneira a aumentar a velocidade na qual as informações são compartilhadas e a qualidade dos dados disponíveis aos supervisores da Caldeira. Para tanto, o projeto foi dividido em três eixos: (a) automatização do processo de relato de incidentes; (b) gestão do sistema supervisório; e (c) gestão e predição dos alarmes, por meio do uso de redes de *Perceptron* Multicamadas (MLP). Os resultados obtidos mostraram aumento no engajamento dos operadores no que concerne à resolução dos problemas de segurança, já que houve um aumento de 57 % no número de relatos de incidentes realizados por eles. A diminuição em 61 % no número de ocorrência de alarmes, o aumento na quantidade de informações disponíveis à Supervisão no Sistema Supervisório e a predição dos alarmes possibilitaram uma maior eficiência e efetividade na tomada de decisões, na previsão e prevenção de falhas, bem como na diminuição dos custos com manutenção corretiva.

**Palavras-chave:** MLP, *Perceptron* Multicamadas, Aprendizado de Máquina, Gestão de Alarmes, EEMUA 191, Sistemas de Segurança, Sistemas de Supervisório, Caldeira de Recuperação, Processo Kraft, Papel e Celulose.



# Abstract

WestRock is a verticalized company, which produces customized packaging, acting in the planting of trees, paper production and packaging. In its paper factory, located in Três Barras – SC, is used the Kraft process of cellulose production. In order to make this process economically viable, it is required the recovery of the chemicals used. The Recovery Boiler is the major equipment of the recovery cycle. In this equipment occurs the degradation of the organic compounds, the reduction of the sodium sulfate in sodium sulfide and the production of steam. For being an essential device for the continuity of the production process and for operating under high vapor pressure, the Recovery Boiler requires a highly reliable safety system. Thus, it is possible to reduce emergency stops or possible accidents with the equipment. At WestRock, the Recovery Boiler accounts 12 % of the annual maintenance budget. However, their security systems have major reliability issues. Among the problems faced are: the difficulty in communication between the Operation and Supervision team, the absence of information in the supervisory system and the underutilization of the alarm system. In the alarm system, there is an excess of occurrences, since, on a daily basis, there are 3,398 alarms. Furthermore, the nomenclatures used and the lack of prioritization of the alarms make it difficult to understand the problem and the scheduling of actions to be taken by the operator to solve problems in the equipment. In this context, this project aims to manage and automate the current security system, in order to increase the speed at which information is shared, and the quality of the available data to the Boiler supervisors. Therefore, the project was divided into three axes: (a) automation of the incident reporting process; (b) supervisory system management; and (c) management and prediction of the alarms, through the use of Perceptron Multilayered networks (MLP). The results obtained showed an increase in the operators' engagement towards the resolution of the security problems, since there was a 57 % raise in the number of incidents reported by them. The 61 % decrease in the number of occurrences of alarms, the increase in the amount of available information to Supervision in the Supervisory System, and the prediction of the alarms allowed a greater efficiency and effectiveness in the decision-making, in predicting and preventing failures, as well as reducing costs with corrective maintenance.

**Keywords:** MLP, Multi-Layer Perceptron, Machine Learning, Alarm Management, EEMUA 191, Safety Systems, Supervisory Systems, Recovery Boiler, Kraft Process, Pulp and Paper.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Caldeira de Recuperação da Fábrica de Papel da WestRock. . . . .	29
Figura 2 – Logo da empresa WestRock . . . . .	36
Figura 3 – Diagrama do Processo Kraft. Fonte: Adaptado de Correia [1] . . . . .	38
Figura 4 – Caldeira flamotubular [2]. . . . .	40
Figura 5 – Caldeira aquatubular [3]. . . . .	41
Figura 6 – Localização dos ares primário, secundário, terciário e quaternário, dos injetores de licor e do nariz de uma Caldeira de Recuperação [4]. . . . .	43
Figura 7 – Relato de Incidente . . . . .	45
Figura 8 – Fluxo de informação para o Relato de Incidente. Fonte: Elaborado pelo autor . . . . .	46
Figura 9 – Funcionamento do sistema de controle e alarmes. Fonte: Adaptado de Logique Sistemas [5] . . . . .	47
Figura 10 – Funcionamento do sistema de alarmes quando mal sintonizado. Fonte: Adaptado de Logique Sistemas [5] . . . . .	49
Figura 11 – Distribuição das prioridades dos alarmes da caldeira de recuperação. . . . .	50
Figura 12 – Representação do <i>on-delay</i> e <i>off-delay</i> [6] . . . . .	56
Figura 13 – Representação do <i>deadband</i> [6] . . . . .	57
Figura 14 – Regressão e Classificação [7] . . . . .	58
Figura 15 – Estrutura do <i>Perceptron</i> [8] . . . . .	59
Figura 16 – Estrutura da rede de <i>Perceptron</i> Multicamada . . . . .	61
Figura 17 – Controladores disponíveis no <i>Integrated Control Configurator</i> [9]. . . . .	62
Figura 18 – Diagrama de controle na rede HART. Fonte: elaborada pelo autor . . . . .	64
Figura 19 – Exemplo de desenvolvimento de tela no Foxboro Draw [9]. . . . .	65
Figura 20 – Infraestrutura do PI System. Fonte: OSISoft . . . . .	67
Figura 21 – Fluxo de Valor do processo de Relato de Incidente . . . . .	69
Figura 22 – Fluxo de informação para o Relato de Incidente . . . . .	70
Figura 23 – Fluxo de valor futuro para o Relato de Incidente . . . . .	71
Figura 24 – Diagrama de sequência para o <i>software</i> de Relato de Incidente . . . . .	71
Figura 25 – Diagrama conceitual que inter-relaciona as informações necessárias para o relato de incidente . . . . .	72
Figura 26 – Fluxo de Valor do processo de Relato de Incidente . . . . .	78
Figura 27 – Teste de performance do <i>SQL Server</i> na <i>Azure</i> . . . . .	79
Figura 28 – Tela de <i>login</i> do aplicativo de relato de incidente . . . . .	80
Figura 29 – Exibição dos relatos realizados pelo Operador selecionado nos últimos 30 dias . . . . .	81
Figura 30 – Telas do sistema de desenvolvimento de relatos pela equipe de operação . . . . .	82

Figura 31 – Telas do sistema de desenvolvimento de relatos pela equipe de operação	83
Figura 32 – Tela inicial do Supervisor	84
Figura 33 – Tela de verificação do relato	84
Figura 34 – Modelo do controlador no <i>PI AF</i>	86
Figura 35 – Modelo do controlador no <i>PI AF</i>	87
Figura 36 – Interface do Sistema Supervisório dos controladores da Caldeira de Recuperação	88
Figura 37 – Detalhes do sistema supervisório dos controladores	89
Figura 38 – E-mails de aviso sobre problemas e modificações nas malhas de controle da Caldeira de Recuperação	90
Figura 39 – Histórico de ocorrência de alarmes na Caldeira de Recuperação nos meses de março e abril	91
Figura 40 – Pareto com os vinte alarmes que mais ocorreram na Caldeira de Recuperação	92
Figura 41 – Distribuição das prioridades dos alarmes da caldeira de recuperação.	94
Figura 42 – Histórico de ocorrência de alarmes na Caldeira de Recuperação nos meses de abril e maio	97
Figura 43 – Gráfico de Pareto com os vinte alarmes que mais ocorreram na Caldeira de Recuperação nos meses de abril e maio.	97
Figura 44 – Histórico de ocorrência do alarme PDIF GAS COMB SUPERAQUECEDOR	98
Figura 45 – Gráfico a quantidade de ocorrência de cada classe referente ao conjunto de dados do alarme de VELOCIDADE TURBOBOMBA AGUA DE ALIMENTACAO	100
Figura 46 – Matriz de confusão para diferentes algoritmos de classificação	102
Figura 47 – Fluxo da integração por arquivos entre <i>PI System</i> e <i>Python</i>	104
Figura 48 – Sistema supervisório das predições dos alarmes da caldeira	105
Figura 49 – Gráfico com a quantidade de relatos realizados mês a mês	106
Figura 50 – Análises em gráfico dos incidentes na área do DRU	106
Figura 51 – Fluxo de operação realizado pelo supervisor para verificar problemas no controle dos equipamentos da caldeira	108
Figura 52 – Histórico de ocorrência de alarmes na Caldeira de Recuperação durante todo o período do projeto	108
Figura 53 – Matriz de confusão para os alarmes que apresentaram uma boa predição pelo algoritmo de MLP, primeira parte	112
Figura 54 – Matriz de confusão para os alarmes que apresentaram uma boa predição pelo algoritmo de MLP, segunda parte	113
Figura 55 – Matriz de confusão para os alarmes que apresentaram uma boa predição pelo algoritmo de MLP, terceira parte	114

Figura 56 – Matriz de confusão os alarmes preditos de maneira mediana pelo MLP	115
Figura 57 – Matriz de confusão os alarmes com resultados ruins de predição . . . .	116
Figura 58 – Matriz de confusão para classificação do alarme 301 utilizando MLP e SVC . . . . .	116



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Informações dos controladores da Caldeira de Recuperação . . . . .	85
Tabela 2 – Os vinte alarmes que mais ocorreram no mês de março e abril . . . . .	92
Tabela 3 – Tempo de vida das ocorrências do alarme de Ar Primário . . . . .	94
Tabela 4 – Matriz de confusão gerada pelo MLP com os melhores parâmetros encontrados empiricamente . . . . .	102
Tabela 5 – Matriz de confusão gerada pelo MLP com os melhores parâmetros encontrados pela função paramétrica . . . . .	103
Tabela 6 – Matriz de confusão gerada pelo MLP com os melhores parâmetros encontrados pela função paramétrica e com as múltiplas camadas encontradas empiricamente . . . . .	103
Tabela 7 – Tempo de reconhecimento do alarme de Particulados da Chaminé por dois turnos diferentes . . . . .	109
Tabela 8 – Resultados da utilização de MLP para criação de modelos de classificação de alarmes. . . . .	110
Tabela 9 – Causas de incidentes no DRU . . . . .	129
Tabela 10 – Perigos ocasionados por incidentes em área . . . . .	131
Tabela 11 – Alarmes selecionados para o projeto . . . . .	133
Tabela 12 – Variáveis utilizadas para predição dos alarmes . . . . .	135



# Lista de abreviaturas e siglas

AF	<i>Analytics Framework</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	<i>Controlador de Processo</i>
CRISP-DM	<i>Cross-Industry Standard Process of Data-Mining</i>
DRU	Departamento de Recuperação e Utilidades
DTU	<i>Database Transaction Unit</i>
EAM	<i>Enterprise Asset Management</i>
EEMUA	<i>The Engineering Equipment and Materials Users Association</i>
GNB	<i>Gaussian Naive Bayes</i>
IBA	Indústria Brasileira de Árvores
ISA	<i>International Society of Automation</i>
ICC	<i>Integrated Control Configurator</i>
LCE	<i>Life Change Event</i>
MD	Mineração de dados
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i>
PaaS	<i>Platform as a Service</i>
PCA	<i>Principal Components Analysis</i>
PI	<i>Plant Information System</i>
PIMS	<i>Plant Information Management System</i>
SDCD	Sistema de Controle Digital Distribuído
SMOTE	<i>Synthetic Minority Over-Sampling Technique</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>

SVC	Máquina de Vetor de Suporte
TAC	Tanque de Alta Concentração
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

# Lista de símbolos

$Na_2CO_3$  Carbonato de Sódio

$NaOH$  Hidróxido de Sódio

$Na_2SO_4$  Sulfato de Sódio

$Na_2S$  Sulfeto de Sódio

$x_k$  Entrada sináptica

$w_{pk}$  Peso sináptico



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	Contextualização	27
1.2	Breve descrição do problema	28
1.3	Objetivos	31
1.4	Técnicas e métodos utilizados	32
1.5	Organização do documento	33
<b>2</b>	<b>MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>35</b>
2.1	Papel e celulose no Brasil	35
2.2	A Empresa	35
2.3	A produção de papel e a utilização dos resíduos químicos do processo Kraft	36
2.3.1	O processo Kraft	37
2.3.2	O ciclo do licor preto e a co-geração de energia	39
2.4	A Caldeira de Recuperação	42
2.4.1	Relatos de Incidente	45
2.4.2	Os alarmes e a EEMUA	46
2.5	Descrição do problema	50
2.5.1	Relatos de Incidentes	50
2.5.2	Sistema Supervisório	51
2.5.3	Sistema de Alarmes	51
2.6	Conclusão	51
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E FERRAMENTAS UTILIZADAS</b>	<b>53</b>
3.1	Gestão dos alarmes	53
3.1.1	Correção de Alarmes	56
3.2	Mineração de dados e Aprendizado de Máquina	57
3.2.1	Perceptron Multicamadas	59
3.3	Foxboro I/A Series	62
3.3.1	Sistema de Alarmes	65
3.4	PI System	66
3.5	Powerapps	67
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E SOLUÇÃO PROPOSTA</b>	<b>69</b>
4.1	Relatos de Incidente	69
4.2	Sistema supervisório	74

<b>4.3</b>	<b>Gestão e predição dos alarmes</b> . . . . .	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO, IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> . . . . .	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Desenvolvimento e implementação</b> . . . . .	<b>77</b>
5.1.1	Automação dos Relatos de Incidentes . . . . .	77
5.1.2	Integração e automação do Sistema Supervisório . . . . .	84
5.1.3	Gestão dos alarmes . . . . .	90
5.1.4	Predição dos Alarmes . . . . .	98
<b>5.2</b>	<b>Análise dos resultados</b> . . . . .	<b>104</b>
5.2.1	Relatos de Incidente . . . . .	105
5.2.2	Sistema Supervisório . . . . .	107
5.2.3	Gestão e predição dos alarmes . . . . .	107
5.2.4	Conclusões . . . . .	116
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS</b> . . . . .	<b>119</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>123</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE A – CAUSAS E PERIGOS NO DEPARTAMENTO DE RECUPERAÇÃO E UTILIDADES</b> . . . . .	<b>129</b>
	<b>APÊNDICE B – ALARMES HISTORIADOS E UTILIZADOS NO PROJETO</b> . . . . .	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE C – VARIÁVEIS DO SISTEMA SUPERVISÓRIO UTILIZADAS PARA A PREDIÇÃO DOS ALARMES</b> . . . . .	<b>135</b>

# 1 Introdução

O presente documento descreve o Projeto Final de Curso desenvolvido durante o estágio na empresa WestRock no decorrer do primeiro semestre de 2019. Nessa monografia, será contextualizado o processo Kraft de produção de papel e a importância da caldeira de recuperação na indústria de papel e celulose. Além disso, serão explanadas as etapas de estudo e previsão dos alarmes da caldeira, bem como a aplicação de técnica de gerenciamento do projeto de alarmes. Através da aplicação desta metodologia aos alarmes, objetiva-se aumentar a confiabilidade do sistema e melhorar a qualidade da informação oferecida ao operador, a fim de que este tenha seu foco voltado para os problemas realmente relevantes.

## 1.1 Contextualização

O processo Kraft tem como objetivo obter a fibra de celulose individualizada e deslignificada. Para a obtenção dessa celulose, utiliza-se métodos físicos, como a alta temperatura de cozimento e rotores de desfibrção mecânica, assim como métodos químicos, entre os quais destaca-se o uso de produtos químicos alcalinos, tais como o sulfeto de sódio ( $Na_2S$ ) e o hidróxido de sódio ( $NaOH$ ). A celulose pode, posteriormente, ser utilizada na produção de papel para embalagem, para impressão ou para higiene.

As vantagens desse processo, frente a outros métodos de obtenção de celulose, são as possibilidades de recuperação dos produtos químicos utilizados e de geração de energia pela queima do licor que resta do cozimento da celulose. Por esses motivos, na atualidade, o processo Kraft é a principal técnica para obtenção de celulose, sendo amplamente utilizado na indústria de papel e celulose brasileira [10].

A Caldeira de Recuperação é o principal equipamento para recuperação dos produtos químicos utilizados no cozimento da celulose. Ela é também a principal fonte de vapor para a indústria de papel e possibilita a co-geração de energia, de modo que a paralisação de sua operação resulta no comprometimento da receita da empresa [4]. Ademais, considerando a sua complexidade e grandeza, eventuais acidentes podem implicar em grandes prejuízos de ordem material e pessoal.

O sistema de segurança da caldeira de recuperação da WestRock possui muitos processos não automatizados, e outros processos possuem falhas de implementação que reduzem a confiabilidade no sistema. Embora ocorra sensoriamento de muitos equipamentos da caldeira, os dados provenientes desses sensores não são utilizados pela operação para prevenção de incidentes e problemas na caldeira. Frente a esse contexto, o presente trabalho busca minimizar os gargalos no sistema de segurança atacando três eixos principais: (a) a

comunicação entre a operação e a supervisão; (b) integração entre os sensores e o sistema supervisão; e (c) a readequação dos alarmes às normas de segurança e utilização destes para prever problemas na caldeira.

A WestRock é uma empresa verticalizada de solução de embalagem, atuando no plantio das árvores, na produção de papel e de papelão, bem como na impressão e corte das embalagens. O projeto descrito nesse relatório foi implementado na fábrica de papel localizada em Três Barras, no estado de Santa Catarina. Por meio desse projeto, a WestRock deseja que seja reduzido o tempo de chegada à Supervisão das informações acerca dos problemas ocorridos na caldeira cheguem, a fim de otimizar o tempo de reparo e mitigar danos aos equipamentos.

Para atingir esse objetivo e atacar cada um dos problemas destacados, é necessário um estudo das peculiaridades da Caldeira de Recuperação da WestRock, de como seus sistemas são integrados e como ocorre o fluxo de informação dentro da fábrica. Além disso, como a caldeira é um equipamento que apresenta riscos e perigos, é importante buscar informações sobre as normas de segurança, tais como as emitidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e pela *The Engineering Equipment and Materials Users Association* (EEMUA). No projeto foram utilizadas técnicas e conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia de Controle e Automação, entre as quais situam-se: (a) Instrumentação; (b) Integração de Sistemas; (c) Informática Industrial; (d) Metodologia para Desenvolvimento de Sistemas; (e) Redes de Computadores para Automação; (f) Inteligência Artificial; e (g) Estatística e Probabilidade.

## 1.2 Breve descrição do problema

A Caldeira de Recuperação é o principal equipamento no ciclo de recuperação do licor de celulose. Ela possui três funções principais: a produção de sulfeto de sódio ( $Na_2S$ ) e carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ), a geração de vapor para consumo na fábrica e a extinção da carga orgânica dissolvida no licor, evitando seu descarte no meio ambiente [11] [12]. Esse equipamento queima o licor preto, subproduto do cozimento da celulose, gerando vapor e se desfazendo da parte orgânica do composto. A parte inorgânica segue para a área da Caustificação, onde o hidróxido de sódio é recuperado para que um novo cozimento ocorra.

Na ausência da caldeira, não há continuidade no processo produtivo de papel Kraft. O licor negro é um composto poluente que não deve ser lançado ao meio ambiente sem o devido tratamento. Portanto, a quantidade de bateladas de fibras designificadas produzida em uma fábrica de celulose depende intrinsecamente do tamanho dos estoques disponíveis para armazenar licor negro e da quantidade desse licor que a caldeira de recuperação consegue queimar.



Figura 1 – Caldeira de Recuperação da Fábrica de Papel da WestRock.

Na WestRock, há apenas uma caldeira de recuperação, a qual encontra-se ilustrada na [Figura 1](#). Ressalta-se que, as paradas para manutenção devem ser previamente analisadas, a fim de que estejam de acordo com o balanço de licor e energético da fábrica. A caldeira é responsável pela maior parte do vapor produzido, cerca de 150 ton/h de vapor de 63  $KgF/cm^2$  de pressão ou 57 % do total produzido na fábrica de Três Barras. Essa caldeira foi construída no ano de 1999 e sofreu duas modificações ao longo dos anos. A primeira, em 2015, alterou a pressão de vapor gerado de 42  $KgF/cm^2$  para 63  $KgF/cm^2$ . A última modificação ocorreu no ano de 2016, e teve como objetivo o aumento da produção de vapor de 136,3 ton/h para 154 ton/h.

A caldeira de recuperação é um equipamento que corresponde, sozinha, a mais de 20% do custo de implantação de uma planta de transformação de madeira em celulose [13]. Esse equipamento custou à WestRock, no período entre outubro de 2018 e maio de 2019, um total de R\$ 1.770.705,89 reais em manutenção. Além disso, a cada hora que esse equipamento permanece inoperante, a fábrica deixa de ganhar 108.094,99 reais com a venda de papel. Portanto, suas paradas para manutenção devem ser planejadas antecipadamente, sendo imprescindível a realização de um balanço, a fim de verificar se há espaço suficiente para armazenar o licor negro que deixou de ser queimado. Também, deve-se aproveitar ao máximo as paradas emergenciais para manutenção corretiva, sendo mais

adequada a execução dos reparos em momentos oportunos (como nas pausas regulares dos equipamentos). Dada a importância desse equipamento, o presente projeto visa possibilitar aos engenheiros responsáveis pela caldeira a obtenção de informações para maximizar o desempenho da caldeira e evitar que os equipamentos entrem em falha.

O controle da caldeira é realizado por uma equipe denominada de Operação. Essa equipe informa à Supervisão acerca dos problemas que ocorrem com o equipamento. A operação possui uma gama de variáveis que podem analisadas no sistema de controle digital distribuído (SDCD). Essas variáveis derivam dos sensores e malhas de controle distribuídos em toda a caldeira. O SDCD possui um conjunto de alarmes que são acionados quando ocorre algum problema com o equipamento; entretanto, esse sistema possui alguns problemas:

- As nomenclaturas dos alarmes não são claras, dificultando a compreensão do problema pelo operador;
- Os alarmes foram mal configurados ou não estão condizentes com a nova configuração da caldeira;
- As prioridades dos alarmes não foram definidas de maneira organizada, o que dificulta a priorização das tarefas pelo operador em momentos de crise.

Esses problemas têm duas causas raízes: a má gestão do projeto dos alarmes quando a caldeira foi construída e a ausência de modificação desse sistema quando foram realizadas as duas modificações na caldeira. Essas disfunções ocasionam a falta de confiabilidade nos alarmes. Na Caldeira de Recuperação, ocorrem, em média, 3.398 alarmes diariamente, muito acima do número definido pela seguradora e padrões definidos pela indústria. O sistema não é utilizado pelo operador em razão da grande quantidade de alarmes que ele recebe durante seu período de trabalho, ou seja, pela banalização da emissão de avisos. Os alarmes acabam recebendo atenção somente no momento em que consumado o problema na caldeira, quando, então, os esforços são direcionados para a descoberta do motivo da falha, e em outros momentos, suas notificações são silenciadas pela Operação.

Outro problema relacionado a esse sistema é a priorização. A maior parte dos alarmes da Caldeira de Recuperação da WestRock possuem prioridades alta ou muito alta, em seguida temos os alarmes com prioridade média e, por último, os com prioridades baixa ou muito baixa, o oposto do proposto por guias de implementação de sistemas de alarmes [14].

Outro problema é a ausência, no sistema utilizado pela Supervisão, de parte das informações disponíveis no SDCD. Muitas vezes, é necessário telefonar ou se comunicar pelo rádio com a operação para se informar sobre algumas informações relativas a caldeira.

Outro ponto crítico é o relato dos incidentes que ocorrem na caldeira. O sistema atual não é informatizado e baseia-se em um intercâmbio de anotações em papel. Dessa maneira, um relato de problema na área da caldeira pode levar até cinco dias para chegar às mãos do engenheiro responsável pela área.

O presente projeto visa, portanto, automatizar o sistema de segurança da caldeira de recuperação, atacando os três principais problemas relatados. Ao final, a solução deve diminuir o tempo no qual a supervisão é informada sobre problemas no equipamento, reduzir as manutenções corretivas e possibilitar uma tomada de ação mais assertiva por parte da operação. Deve, também, possibilitar a implementação de manutenções preditivas dos equipamentos da caldeira e a identificação das causas raízes das falhas apresentadas.

### 1.3 Objetivos

O projeto de automatização do sistema de segurança da caldeira de recuperação da WestRock tem como objetivo geral facilitar a comunicação entre a Operação e a Supervisão, bem como melhorar a interface entre o sistema de controle e o *software* supervisor. Assim, a Supervisão terá insumos sobre o processo em tempo hábil, tornando-se possível a tomada de decisões em um menor período de tempo, além de haver uma diminuição dos possíveis problemas que necessitem de manutenções corretivas. Para atingir tal objetivo, torna-se necessário combater os três principais gargalos: (a) o processo de relato de incidentes; (b) a interface do SDCD e o supervisor; e (c) a gestão de alarmes.

Os seguintes objetivos específicos foram determinados a fim de que fossem atingidos os objetivos gerais:

- Identificar os equipamentos da caldeira de recuperação que mais entram em falha;
- Verificar os meios de comunicação disponíveis no departamento;
- Formular uma nova ferramenta para a realização dos relatos de incidentes;
- Estudar métodos de identificação de problemas nos sensores, atuadores ou controladores da caldeira de recuperação;
- Integrar as informações do SDCD ao supervisor;
- Analisar o sistema de alarmes da caldeira de recuperação, de forma a verificar os problemas nesse sistema;
- Corrigir os problemas com o sistema de alarmes;
- Prever a futura ocorrência dos alarmes para que seja possível agir de maneira preventiva;

- Integrar as novas ferramentas desenvolvidas no sistema supervisório para que uma visão global da situação da caldeira seja facilmente visualizada pela Supervisão.

## 1.4 Técnicas e métodos utilizados

Para verificar os pontos críticos relacionados à operação e manutenção da caldeira de recuperação, procedeu-se um levantamento acerca dos equipamentos que mais demandam reparo. Também, foi realizada uma análise acerca do fluxo de informação na área, da integração entre os diversos sistemas, bem como dos métodos de aprendizado de máquina. Com esse dado em mãos, buscou-se identificar os processos dentro do Departamento de Recuperação e Utilidades que poderiam ser melhorados para diminuir os problemas da caldeira. O projeto foi, então, subdividido nos três eixos distintos supracitados, e em cada um desses eixos foram utilizadas técnicas e métodos diferentes, conforme descrito a seguir.

**Eixo 1 - Relatos de Incidente:** Para corrigir os problemas de comunicação entre operação e supervisão, foram analisados os métodos atuais de divulgação de informação. Uma das vias utilizadas para o relato de problemas em área, o Relato de Incidente, foi avaliado, com a verificação dos agentes responsáveis pela comunicação em área e, posteriormente, com o desenvolvimento de um *software* capaz de interconectar os funcionários da Operação e Supervisão. Como resultado dessa implementação, houve um aumento de 57% dos relatos realizados e a cientificação da Supervisão. Além disso o tempo de comunicação passou a ser realizado em tempo real, e não mais nos dois dias do sistema anterior.

**Eixo 2 - Integração SDCD e Sistema Supervisório:** A ausência da disponibilização da informação imediata acerca de um problema apresentado pelo sistema, resulta na necessidade, posterior, de manutenção corretiva do equipamento, sendo que, caso houvesse a informação tempestiva, bastaria a manutenção preventiva. Portanto, estudou-se um método para que fosse possível ter um panorama geral da caldeira. Determinou-se que verificar o estado de um controlador poderia ser uma maneira de identificar se há um problema em um sensor ou atuador, pois, de maneira geral, o operador da caldeira coloca o controlador em manual quando observa um problema em um desses itens. Outro fator a ser analisado é o erro entre o *setpoint* selecionado e a variável de processo. Um erro muito elevado sugere um problema na estipulação dos parâmetros do controlador, ou, então, um atuador ou sensor danificado. Foram, portanto, integradas as principais informações das malhas de controle da caldeira de recuperação com o sistema supervisório utilizado pela Supervisão. Foram desenvolvidos alertas por e-mail quando um controlador transiciona para o modo manual ou para quando o erro de controle ultrapassa os limites pré-estabelecidos.

**Eixo 3 - Gestão e predição de Alarmes:** Para a correção do sistema de alarmes foi utilizada a norma EEMUA 191, que define como um sistema desse tipo deve operar, de

maneira a facilitar o trabalho do operador, diminuir os problemas mais graves e organizar as informações em momento de crises. Os alarmes mal configurados foram corrigidos, a fim de minimizar sua ocorrência e as suas prioridades foram redefinidas. Por fim, foi utilizado o algoritmo de classificação denominado *Perceptron Multi-Camada*, com o objetivo de prever a ocorrência dos alarmes pertencentes aos equipamentos que mais necessitam de manutenção dentro da caldeira. Dessa forma, foi possível a diminuição do tempo no qual o operador corrige o problema apresentado. A gestão dos alarmes, diminui em 61 % o número de incidência de alarmes.

## 1.5 Organização do documento

Esse relatório está dividido em seis capítulos. O Capítulo 2 é destinado à apresentação da empresa WestRock e a elucidação da motivação do projeto, por meio da descrição do processo Kraft de produção de celulose, do ciclo de recuperação de licor negro e da caldeira de recuperação. Além disso, será analisado com profundidade as principais dificuldades enfrentadas na operação dessa caldeira. Por fim, serão apresentados os problemas abordados no presente trabalho. No Capítulo 3, é feita a descrição das ferramentas utilizadas para realização do projeto, além da fundamentação teórica necessária para desenvolvimento da solução do problema apresentado. Nesse mesmo capítulo, serão apresentadas técnicas de classificação e discorrer-se-á sobre como elas podem auxiliar na predição de alarmes na caldeira de recuperação. São explicadas com mais profundidade as redes de Perceptron Multi-Camadas e a aplicação destas no campo de aprendizado de máquina. O Capítulo 4 apresenta os requisitos técnicos a serem atendidos, a solução proposta e a metodologia utilizada. No Capítulo 5, faz-se uma análise da implementação realizada com a apresentação dos resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.



## 2 Motivação e descrição do problema

Nesse capítulo, são apresentados: um panorama da produção de celulose e papel no Brasil; a empresa WestRock, na qual o projeto está inserido; o processo Kraft de produção de celulose; e a utilização dos resíduos químicos oriundos desse processo. Também será analisado com profundidade as principais dificuldades enfrentadas pela operação e manutenção da Caldeira de Recuperação. Na Seção 2.1 e Seção 2.2, serão mostrados dados que ilustram o quão representativa é a indústria de papel e celulose para a economia brasileira, assim como um breve histórico da WestRock, empresa na qual o projeto foi implementado. A Seção 2.3 apresentará o processo de obtenção de celulose na fábrica de papel de Três Barras, o processo Kraft e, também, o ciclo de recuperação do licor negro. A Seção 2.4 ilustrará a importância da caldeira de recuperação nesse processo. Por fim, a Seção 2.5 descreverá o problema abordado no presente projeto.

### 2.1 Papel e celulose no Brasil

No Brasil, há grandes empresas de papel e celulose, as quais são fruto de condições ambientais que permitem a alta produtividade de árvores de pinus e eucalipto. Segundo IBA 2018 [15], entre janeiro e setembro de 2018, foram produzidas mais de 7768 toneladas de papel, sendo que esse setor é responsável por 4,5% das exportações brasileiras.

O relatório de 2014 da Indústria Brasileira de Árvores [16] mostra que o Brasil é país líder global na produtividade florestal. No país, para se gerar 1,5 milhão de toneladas de celulose, são necessários 140 hectares de floresta. Esses resultados só foram possíveis graças ao histórico compromisso da indústria brasileira com o melhoramento genético e das técnicas de manejo florestal [16].

O mesmo relatório mostra que as florestas plantadas ocupam, em geral, áreas previamente desmatadas ou que fazem parte do fomento florestal. Essas características reduzem o impacto ambiental gerado por esse tipo de atividade. Vale ressaltar, também, que a área preservada pelo setor de árvores plantadas representa 13,3% do total de hectares de habitats naturais preservados no Brasil fora de unidades de conservação.

### 2.2 A Empresa

A WestRock surgiu da fusão entre a MWV, empresa da qual a Rigesa fazia parte, e a RockTenn. É uma empresa verticalizada, que tem como objetivo a fabricação de soluções de embalagens personalizadas. A fabricação passa por diversos processos, em diferentes

plantas localizadas no Brasil. A empresa é responsável desde o plantio de Pinus e Eucalipto, passando pela fabricação da celulose e papel, até a confecção das embalagens. O logo da WestRock é mostrado na figura abaixo.



Figura 2 – Logo da empresa WestRock

Em Três Barras, no Estado de Santa Catarina, está localizada a única fábrica de papel da empresa no Brasil. Fundada em 1974, possuía uma única linha para processamento de madeira de Pinus e uma máquina de fabricação de papel. Tal estrutura era suficiente para suprir a demanda por papel das fábricas de embalagem da então Rigesa e, ainda, possibilitava uma sobreprodução de papel para venda a terceiros. Entretanto, em 2010, ocorreu a maior expansão desde a inauguração da fábrica. Nessa expansão, foram instalados uma nova linha para processamento de madeira de Eucalipto, uma planta para processamento de fibras recicladas e uma nova máquina de papel. Com os novos equipamentos, atingiu-se uma produção de 1215 toneladas de papel por dia. Em 2015, após reformas estruturais e do chão-de-fábrica, passou-se a produzir 1300 toneladas de papel por dia apenas na unidade de Três Barras.

### 2.3 A produção de papel e a utilização dos resíduos químicos do processo Kraft

O processo Kraft é utilizado na maioria das fábricas produtoras de celulose brasileiras [10], não apenas por oferecer um papel de alta resistência, ideal para a produção de embalagens, como também, por combinar a queima do licor produzido e a recuperação do calor e dos produtos químicos numa mesma unidade do processo. Nessa seção, será descrito o processo Kraft e também como se pode recuperar os resíduos químicos por ele produzidos.

### 2.3.1 O processo Kraft

O processo Kraft é um processo de deslignificação da celulose. Conforme sugere KLEPPE 1970 [17], a criação desse processo se deu pelo pesquisador alemão Dahl, em 1879. A deslignificação é o processo responsável por retirar a lignina presente na madeira e obter a celulose pura. No processo Kraft, para obtenção de uma fibra de celulose individualizada, utiliza-se de alta temperatura, sulfeto de sódio ( $Na_2S$ ), hidróxido de sódio ( $NaOH$ ) e de um processo mecânico. Essa celulose é, futuramente, utilizada para a fabricação de papel, seja para impressão, embalagem ou higiene.

Nesse processo, obtém-se um papel de maior resistência, que pode ser produzido de várias espécies de árvores. Através dele, é possível recuperar grande parte dos produtos químicos utilizados, diminuindo, assim, as perdas químicas. A fábrica de papel que utiliza do processo Kraft pode gerar sua própria energia a partir da queima do licor resultante do cozimento da celulose. Cerca de metade do peso da madeira é dissolvida no processo de separação das fibras, formando o licor preto. Esse licor é utilizado, posteriormente, como biocombustível para a fábrica de papel e celulose.

Na atualidade, a principal rota para obtenção de celulose é o processo Kraft, de acordo com ALVES 2015 [10]. Esse processo é ilustrado na [Figura 3](#), na qual é possível visualizar as várias etapas presentes: o descascamento do pinus, a picagem da madeira em cavacos, o cozimento e a lavagem. O papel para embalagens não necessita do branqueamento, sendo essa etapa necessária somente caso se deseje um papel para impressão ou o papel *tissue* (usado como papel higiênico e na confecção de fraldas).

Na etapa do cozimento, ilustrada na [Figura 3](#), temos a dissolução da lignina para a obtenção de uma massa de madeira com fibras individualizadas de celulose. Após esse cozimento, a celulose é armazenada no Tanque de Alta Concentração (TAC), a fim de que, futuramente, seja utilizada na fabricação de papel para embalagens. Os resíduos químicos e parte da carga orgânica da madeira ficam dissolvidos em uma solução aquosa, que, na indústria de papel, é chamada de licor preto.

Segundo ALVES 2015 [10], para aumentar a viabilidade econômica e o cuidado ambiental da indústria, é necessário fazer a recuperação dos produtos químicos presentes no licor e dar o destino correto aos seus subprodutos. O licor preto que sai do digestor – nome dado ao tanque de cozimento –, por ter concentração de sólidos baixa, é chamado de licor preto fraco. Para ser possível a sua queima na caldeira, é necessária a sua concentração, e, por isso, a evaporação é a primeira etapa para a recuperação dos químicos, como ilustra a [Figura 3](#).

O licor preto fraco, portanto, passa por um sistema de evaporadores de múltiplos efeitos, cuja etapa, como ilustrado na [Figura 3](#), é chamada de Evaporação. Essa série de evaporadores é suficiente para aumentar a taxa de orgânicos do licor de 20% para, aproxi-

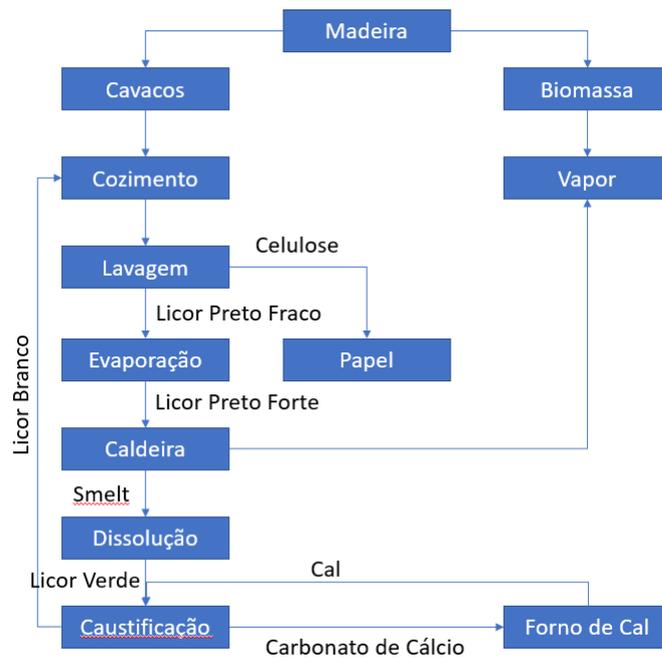


Figura 3 – Diagrama do Processo Kraft. Fonte: Adaptado de Correia [1]

madamente, 42%. Depois dos evaporadores, o licor passa por uma série de concentradores e seu percentual de orgânicos chega a 70%, sendo essa a concentração ideal para a queima na caldeira de recuperação da WestRock. Por fim, esse licor concentrado passa a se chamar de licor preto forte.

A parte orgânica do licor é queimada na Caldeira e a inorgânica passa por um processo de recuperação. Nessa etapa, recupera-se o hidróxido de sódio e o sulfeto de sódio utilizado no cozimento da celulose. Esse processo de recuperação é chamado, no âmbito industrial, de caustificação, como ilustrada na [Figura 3](#).

O calor gerado pela queima da parte orgânica do licor é responsável pela geração de vapor. Esse vapor é utilizado nas turbinas dos turbo geradores para prover energia para a fábrica. A biomassa, composta por cascas, folhas e cavacos fora de especificação, também é queimada para a geração de vapor.

Entre as desvantagens desse processo, ALVES 2015 [10] menciona o alto custo, as emissões de odores no ambiente, o baixo rendimento (entre 40 a 50%) e a baixa alvura. Entretanto, mesmo com essas desvantagens, o ciclo de recuperação torna-se uma boa fonte de energia para a indústria, fazendo com que esse o processo seja ecologicamente correto. Em seu artigo, ALVES 2015 [10] sustenta que, com a planta de recuperação instalada, diminui-se os custos com a fabricação e torna-se todo o processo economicamente viável.

### 2.3.2 O ciclo do licor preto e a co-geração de energia

As caldeiras são o principal instrumento para obtenção de vapor e possuem normas rígidas quanto a sua operação, como a NR-13 [18], no Brasil. Existem vários tipos distintos de caldeiras que utilizam os mais diversos combustíveis para gerar calor. Nas fábricas de papel e celulose, três materiais são comumente utilizados para queima: o óleo combustível, o licor preto e a biomassa. Cada um desses materiais necessitam de uma estrutura distinta para que ocorra a sua combustão completa e, segundo Alberich [19], essa estrutura necessita ser altamente resistente para aquecer a água em estado líquido até o estado gasoso.

A Norma NR-13 [18] prevê alguns tipos de caldeiras baseados na pressão do vapor produzido, no combustível utilizado e no grau de automação de sua operação. Portanto, podemos classificá-las como se segue.

- Quanto à pressão de trabalho

Categoria A: pressão de trabalho superior a  $20\text{KgF}/\text{cm}^2$ ;

Categoria C: pressão de trabalho igual ou inferior a  $6\text{KgF}/\text{cm}^2$  e volume interno igual ou inferior a 100 litros;

Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

- Conforme o combustível utilizado

Sólido;

Líquido;

Gasoso;

Eletricidade.

- Conforme o grau de automação

Automática;

Semi-automática;

Manual.

Outra classificação muito utilizada pela indústria é a diferenciação dos modelos pela estrutura disponível para passagem de combustível. Em geral, as caldeiras são divididas em dois grupos: flamotubulares e aquatubulares. Nas caldeira do tipo flamotubulares, como ilustrada na Figura 4, os gases provenientes da combustão passam por dentro de tubos de fornalha e, por troca térmica, aquecem a água contida no vaso de pressão. O compartimento onde a água está contida é chamado na Figura 4 de parede de água. Os tubos perpassam todo o entremeio da caldeira de forma a aumentar a superfície de contato e transportam os gases de combustão até a chaminé. Tais caldeiras são, em geral, compactas

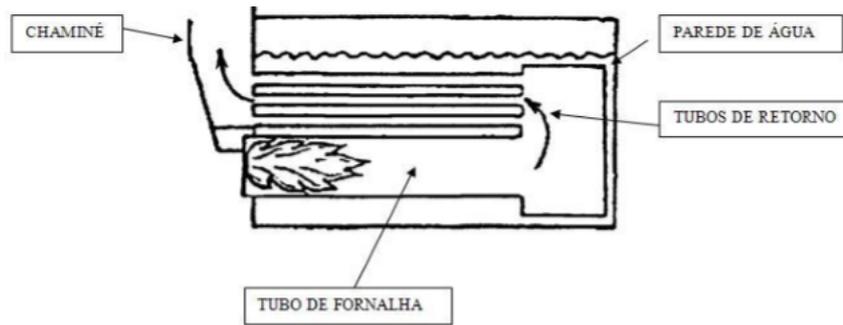


Figura 4 – Caldeira flamotubular [2].

e utilizadas quando há uma baixa demanda por vapor e em pressões reduzidas. Isto ocorre, pois as partes internas da caldeira, submetidas à pressão, são de grande dimensão, o que inviabiliza a utilização de chapas metálicas mais espessas [20].

As caldeiras aquatubulares, ilustradas na Figura 5, caracterizam-se pela passagem de gases externamente aos tubos, dentro dos quais ocorre a passagem de água e vapor. Esse tipo de caldeira possui uma utilização mais ampla, pois os vasos pressurizados internos possuem menores dimensões relativas, o que permite o emprego de maiores espessuras das chapas metálicas e, conseqüentemente sua utilização com maiores pressões de vapor [20]. Na caldeira aquatubular, é possível o emprego de acessórios, como os superaquecedores, ilustrados na Figura 5, próximos à zona de convecção, que fornece vapor superaquecido, necessário para o funcionamento de turbinas [19]. Portanto, essas são as caldeiras utilizadas quando consideramos a cogeração de energia elétrica.

As caldeiras de recuperação da indústria de papel e celulose são do tipo aquatubulares. Nelas, o licor preto é pulverizado em pequenas partículas no interior da fornalha, também chamada de zona de radiação, na Figura 5. O licor passa, então, pelas três etapas da combustão: a secagem, na qual a água é evaporada; a volatização e/ou pirólise, etapa na qual os compostos voláteis são liberados; e, por fim, a combustão homogênea, em que os gases de combustão são liberados. Tal tipo de caldeira é de grande interesse industrial, pois permite:

- Reduzir o sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ), produzindo carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) e Sulfeto de Sódio ( $Na_2S$ );
- Aproveitar a energia liberada pela combustão dos compostos orgânicos do licor preto para a geração de vapor, que, futuramente, pode ser utilizado na co-geração de energia;
- Queimar os compostos orgânicos do licor preto.

Uma série de estruturas e dispositivos devem ser disponibilizados para que ocorra uma combustão completa e segura. Os principais componentes estão também ilustrados

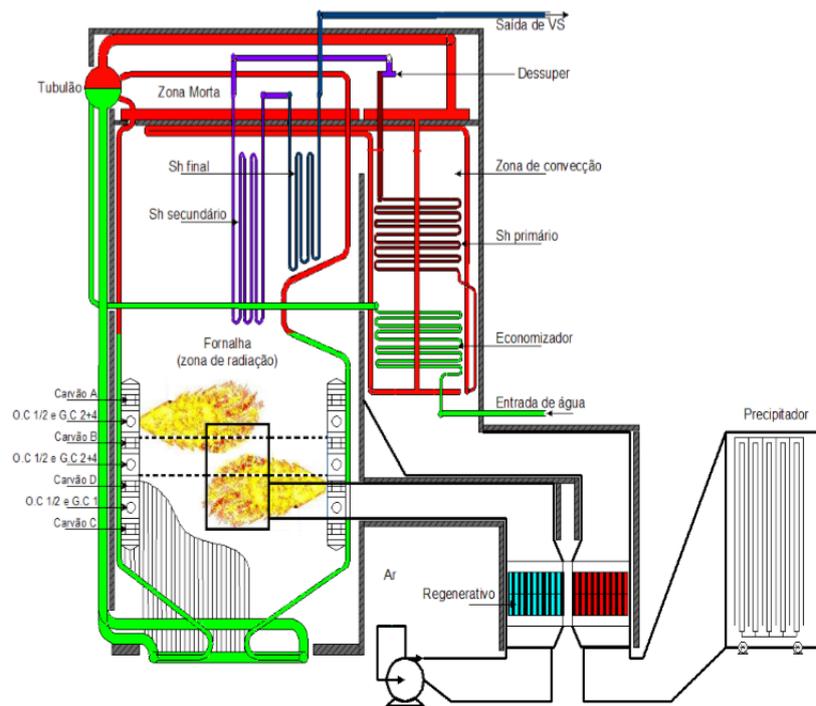


Figura 5 – Caldeira aquatubular [3].

na Figura 5, entre eles o economizador, o balão de vapor ou tubulão, as paredes de água, o superaquecedor, a fornalha, os sopradores, os ventiladores, os desaeradores e os injetores de combustível. A água desmineralizada passa pelo desaerador onde, por meio do aquecimento, os gases são retirados. Essa água já desaerada é essencial para a não oxidação dos componentes da caldeira. Após o desaerador, a água é pré-aquecida no economizador, que aproveita os gases da saída da caldeira como fonte de calor. Assim, a água está preparada para ser transformada em vapor.

As paredes da caldeira de recuperação são formadas por tubos que conduzem água e vapor; por isso, são chamadas de paredes de água. Os tubos levam a água até o balão de vapor, no qual ocorre a separação do vapor saturado. Esse vapor prossegue para o superaquecedor, que aumenta seu grau de superaquecimento. Dessa maneira, a temperatura do vapor distancia-se da temperatura de saturação e, assim, deixa-o apto para ser utilizado no processo produtivo e em turbinas de vapor.

Na fornalha, o licor é aspergido pelos injetores, ocorrendo a degradação da matéria orgânica desse composto e a redução do sulfato de sódio, com a obtenção do *smelt*. Essa combustão ocorre em duas partes da fornalha: logo após os injetores e no leito carbonizado, no assoalho do equipamento. É nesse leito que o fundido inorgânico é formado, captado e conduzido até o processo de caustificação. Para ocorrer uma boa queima, uma boa transferência térmica e para também evitar a formação de incrustação é necessário a utilização de sopradores. Eles oxigenam a combustão e provocam perturbações no fluxo de

gases, de maneira a melhorar a distribuição de calor no volume da caldeira. Esse dispositivo derruba incrustações e possibilita a diminuição da formação de pedras de cloreto e potássio advindos da madeira.

Os ventiladores fazem a exaustão dos gases e permitem que eles sejam conduzidos ao precipitador eletrostático. Nesse equipamento, as cinzas são coletadas e transferidas para a área de caustificação, onde são recuperadas. A chaminé, dessa maneira, apresenta pouca quantidade de sólidos em sua fumaça. Graças a esse equipamento, é possível deixar a queima de licor preto menos danosa ao meio ambiente.

Os riscos associados aos processos que utilizam da caldeira de recuperação decorrem do armazenamento de substâncias a pressões e temperaturas muito diferentes das encontradas em situações normais. Portanto, esse tipo de equipamento requer muita atenção por parte da equipe de segurança, desde a sua montagem até a conclusão de sua vida útil. A sua construção e projeto devem ser cuidadosamente planejados, pois a caldeira exerce papel importante na continuidade do processo produtivo. Campos 2011 [21] descreve, em sua monografia, as consequências mais comuns dos acidentes com caldeiras, entre elas: (a) fatalidades envolvendo danos às pessoas; (b) danos materiais aos equipamentos; (c) danos financeiros, devido à perda de produção; (d) danos ambientais; (e) custos com limpeza, sanções legais, indenizações, entre outros.

## 2.4 A Caldeira de Recuperação

A Caldeira de Recuperação da WestRock foi construída em 1999 com o intuito de suprir adequadamente a demanda de vapor e queima de licor negro. Inicialmente, ela produzia 136,3 ton/h de vapor a uma pressão de 42  $KgF/cm^2$ . Porém, com a instalação de um turbo-gerador que necessitava de vapor a 63  $KgF/cm^2$  de pressão, foi necessária uma modificação em sua estrutura para a produção de vapor com essas características. Essa reestruturação aconteceu no ano de 2015 e modificou as válvulas de alívio da caldeira, de maneira a possibilitar a passagem de vapor de mais alta pressão.

No ano de 2012, foi realizado uma expansão na fábrica. Nessa ampliação, foi construída mais uma máquina de papel e, para aumentar a produção de papel, houve a necessidade de aumentar o consumo de vapor. Além disso, com mais celulose sendo consumida, mais licor negro passou a ser descartado pelo Departamento de Celulose. Essa situação provocou um sobrecarregamento na Caldeira de Recuperação, que motivou uma segunda etapa na reestruturação desse equipamento. Em 2016, foram realizadas diversas modificações que culminaram no aumento do volume de vapor produzido para 154 ton/h. Essas modificações consistiram em: (a) um encurtamento do nariz da caldeira, de forma a aumentar a quantidade de vapor na área dos superaquecedores; (b) instalação de mais um ventilador de ar terciário; e (c) instalação de um novo superaquecedor.

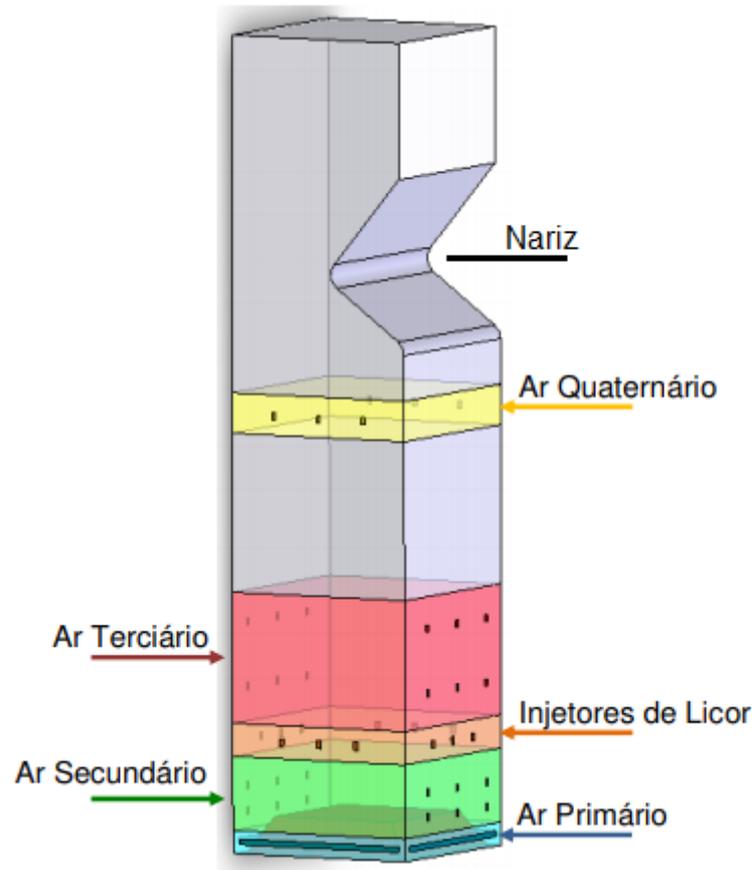


Figura 6 – Localização dos ares primário, secundário, terciário e quaternário, dos injetores de licor e do nariz de uma Caldeira de Recuperação [4].

O nariz da caldeira é uma saliência na fornalha, ilustrada na [Figura 6](#), com o propósito de recircular os gases de combustão através da geração de perturbações na passagem desses gases. O encurtamento de seu tamanho permite que haja um fluxo de gases menos revolto e uma maior quantidade de calor na região superior da caldeira, onde se encontram os superaquecedores permitindo a otimização do uso desses equipamentos.

Com o passar dos anos, a Caldeira de Recuperação da WestRock passou a envelhecer e mais equipamentos começaram a falhar. Ademais, passou-se a requisitar mais vapor para produção de papel, para a evaporação da água do licor e para o cozimento da celulose. Essa nova realidade deixou a caldeira sempre trabalhando em sua produção máxima e acarretou maior desgaste de seus componentes, comprometendo a confiabilidade no equipamento.

Para a produção de vapor na fábrica da WestRock, há outras duas caldeiras. Uma delas, a Caldeira de Força, queima biomassa originária dos descartes advindos do processamento da madeira e produz aproximadamente 130 ton/h de vapor. Como essa biomassa é armazenada em grandes pilhas e exposta às intempéries, em dias chuvosos, é necessário a inclusão de óleo xisto na queima para não comprometer a produção de vapor. Quando ocorre algum problema emergencial ou uma parada programada em alguma das

duas caldeiras apresentadas, é acionada uma segunda Caldeira de Força. Essa caldeira, por sua vez, utiliza apenas o óleo xisto como combustível e produz pouco mais de 20 ton/h de vapor a 11  $KgF/cm^2$  de pressão. O vapor a essa pressão só pode ser utilizado para aquecimento e não é adequado para o uso nas turbinas dos geradores.

Como a Caldeira de Recuperação é o único equipamento disponível na fábrica capaz de queimar licor negro e é o maior produtor de vapor, cerca de 55 % da produção total, é de extrema importância que esse equipamento opere continuamente, sem interrupções. Toda parada do equipamento deve ser previamente estudada, pois não é possível dar continuidade ao processo produtivo sem ela, seja pelo pequeno espaço reservado para armazenar licor negro ou pela incapacidade de suprir a demanda de vapor apenas com as duas caldeiras de força.

Para operar esse equipamento, é necessária uma equipe composta por cinco cargos, divididos em cinco turnos distintos de seis horas, totalizando vinte e cinco pessoas. Os referidos cargos são:

- **Mestre:** Lidera a equipe de operação, tanto da caldeira quanto de outras áreas do departamento. Possui muita experiência sobre o processo executado e faz o interfaceamento com a Supervisão e outros departamentos.
- **Operador de Caldeira de Recuperação:** Opera, por meio do SDCD, a Caldeira de Recuperação, seus equipamentos auxiliares, a Evaporação e a Concentração. Opera a caldeira com auxílio do Operador Assistente e orienta as atividades do Operador Auxiliar. Além disso, realiza testes hidrostáticos, curvas de aquecimento e revisa anualmente os manuais e procedimentos da área.
- **Operador Assistente de Caldeira de Recuperação:** Opera, sob supervisão do Operador, os Evaporadores e Concentradores. Realiza rondas por todos os andares da caldeira, relatando ao Operador qualquer irregularidade encontrada. Auxilia no acendimento dos queimadores de óleo e na troca dos bicos queimadores de licor. Por fim, controla a remoção e a decantação do sabão existente no licor preto.
- **Operador Auxiliar de Caldeira de Recuperação:** Controla a bica de *smelt*, mantendo-a sempre limpa a fim de evitar entupimento no bico fragmentador. Verifica a temperatura da caldeira com auxílio de termômetros. Inspecciona e realiza limpezas no sistema de lavagem de gases do tanque de dissolução, bem como nas vigias e nos *dampers* de ar.
- **Ajudante de Caldeira de Recuperação:** Acompanha o descarregamento do caminhão de óleo combustível e caminhões de licor preto. Abastece o silo de sulfato de sódio. Realiza limpezas na área e sala de controle. Busca materiais necessários

para a operação no almoxarifado. Realiza coleta e análise do licor preto queimado na caldeira e do licor verde produzido por ela.

### 2.4.1 Relatos de Incidente

Quando ocorre um problema no chão-de-fábrica, seja um equipamento defeituoso ou um problema de conduta, o procedimento utilizado pela equipe de Operação para comunicá-lo à Supervisão é o Relato de Incidente. O processo de comunicação de incidente é iniciado com um bloco de papel contendo uma série de campos a serem preenchidos. Esse documento pode ser visualizado na [Figura 7](#), na qual cada um desses campos descreve parte do problema encontrado e facilita, à Supervisão, a compreensão do incômodo encontrado.



1 - Solicitante:	
Depto.:	Data:
2 - Local da ocorrência (Processo)	
Nome da Empreiteira Observada (Se Houver)	
3 - Código da Causa:	4 - Código do Perigo:
5 - Descrição:	
6 - Ações:	
7 - Tratamento Sugerido:	
Completo <input type="checkbox"/>	Parcial <input type="checkbox"/>
8 - Classificação:	
Melhoria <input type="checkbox"/>	Manutenção <input type="checkbox"/>

Figura 7 – Relato de Incidente

Por meio desse documento, a equipe de segurança pode verificar a existência de possíveis *Life Change Events* (LCE). Os LCEs são acidentes que podem ocorrer no ambiente fabril e transformar - definitivamente - a vida de uma ou várias pessoas. Extinguir esse tipo de acidente é prioridade dentro da WestRock e um dos instrumentos utilizados para aferir locais de perigo é o Relato de Incidente. Para isso, há a necessidade de preencher o código do perigo e a causa associado ao problema, como, por exemplo, o código s11.01, que diz respeito ao perigo de exposição de partículas e/ou poeiras, e o código s21.09, que consiste no perigo de exposição ao ruído. Ainda a título exemplificativo, cita-se o código 1005, que tem como causa a inoperância dos dispositivos de segurança ou equipamentos de controle, bem como o código 1023, que tem como causa a falta de treinamento ou de orientação.

A forma como a informação é transmitida se dá pela passagem desse documento por diversos funcionários, até a sua chegada à Supervisão. O fluxo dessa informação é ilustrado na Figura 8, por meio da qual se percebe que há uma série de indivíduos responsáveis por essa atividade. Ao apurar uma adversidade em área, o operador escreve um relato e passa para o Mestre de seu turno. No outro dia pela manhã, o Mestre envia para a assistente administrativa do departamento todos os relatos recebidos no dia anterior. Essa, por sua vez, encaminha os papéis ao engenheiro ou especialista responsável pela área do incidente. Então, é aberta uma ordem de serviço à Manutenção para reparo do equipamento, anotando-se o número da ordem no documento e repassando-o novamente para a assistente administrativa. Finalmente, a assistente transfere os dados do relato para o documento *Access*, utilizado pela equipe de segurança para compilar todos os incidentes.

Os problemas enfrentados por esse método de comunicação são inúmeros. Porém, três são mais expressivos: (a) o tempo decorrido entre a confecção do relato e a abertura de uma ordem de serviço, que pode ser de até cinco dias; (b) a perda rotineira desse documento, por ser um papel de pequenas dimensões que é manuseado por diversas pessoas; e (c) a ausência de recebimento de um *feedback*, pelo operador, que indica se houve a execução de alguma ação reparadora ao incidente apresentado.



Figura 8 – Fluxo de informação para o Relato de Incidente. Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.4.2 Os alarmes e a EEMUA

*Engineering Equipment and Materials Users Association* (EEMUA) é uma associação sem fins lucrativos reconhecida internacionalmente por compartilhar experiências e informações aos usuários de materiais e equipamentos de engenharia. Assim sendo, facilita aos usuários membros a melhora de seus ativos industriais, aumentando a segurança e desempenho de suas operações, além de diminuir os impactos ambientais provocados pela indústria. Essa associação surgiu no período de reconstrução e mudanças que ocorreram pós Segunda Guerra Mundial, em uma época na qual houve grande crescimento das indústrias

químicas, assim como das indústrias de óleo e de gás. Muitos produtos novos eram criados e novas tecnologias de produção eram desenvolvidas rapidamente, o que fez com que normas e guias convencionais falhassem em se manter atualizados perante as novidades da indústria. A EEMUA, portanto, evoca uma característica menos burocrática e formal de estrutura e opta por uma comunicação rápida, via áudio ou internet, para divulgação de seus trabalhos. Suas áreas de trabalho são: (a) automação, controle e eletricidade; (b) equipamentos, operação e manutenção; (c) inspeção e gestão da integridade; (d) engenharia, intervenção e construção; e (e) armazenamento e distribuição.

Um alarme consiste em um aviso - sonoro ou visual - para o operador do equipamento, com a finalidade de atentá-lo a situações anormais na planta. O operador deve, então, ter condições de tomar uma decisão, a fim de sanar o problema relatado [14]. Caso o operador não tenha tempo suficiente para agir em prol da solução do alarme ou caso não haja possíveis ações a serem tomadas, não se deve levar essa informação para o operador, pois configurar esse tipo de problema como um alarme irá sobrecarregar desnecessariamente o operador.

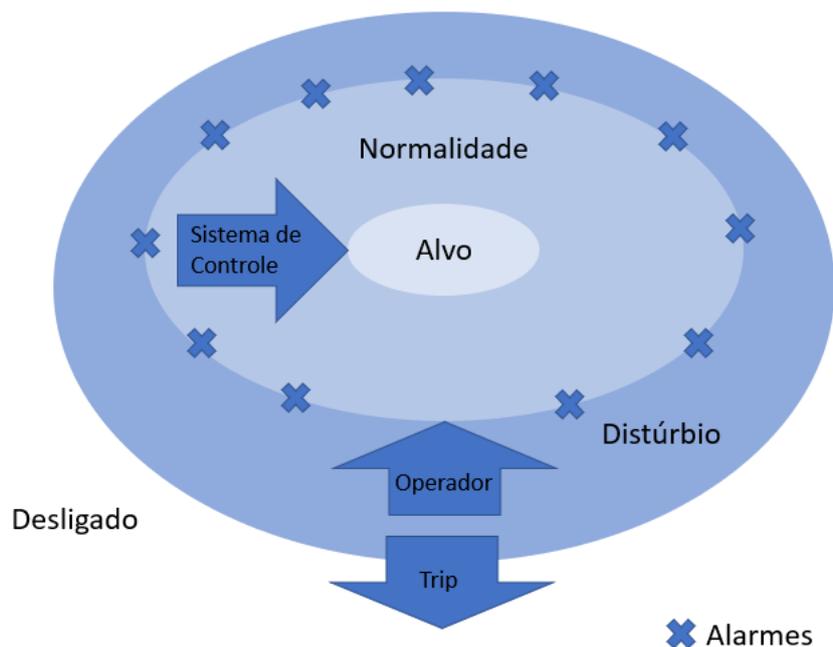


Figura 9 – Funcionamento do sistema de controle e alarmes. Fonte: Adaptado de Logique Sistemas [5]

A Figura 9 define, segundo o guia de implementação EEMUA 191 [14], como um sistema de gestão de alarmes deve operar. Esse guia foi desenvolvido pela EEMUA com a finalidade de aumentar a confiabilidade dos sistemas de alarmes industriais. Nele, há diretrizes de projeto, manutenção e provisionamento desses sistemas. Na Figura 9, temos quatro estados possíveis nos quais um sistema industrial pode operar. O "alvo" é o

estado ótimo de operação, sendo esse definido por meio dos *setpoint* dos controladores, que permitem que o sistema, dentro da normalidade, atinja seu estado desejado. O estado de distúrbio é provocado por um problema que ocorre na planta. Nesse caso, a operação deve tomar atitudes para que o sistema volte ao seu estado de normalidade. O limiar entre o estado normal e o de distúrbio é definido por meio dos alarmes. São os alarmes que informam ao operador a ocorrência de mudança no sistema, desde que eles estejam definidos de maneira correta e que seus parâmetros de ativação sejam pontos no limite da normalidade. A região de "desligado" é o momento no qual o sistema desliga-se para evitar maiores danos. Na WestRock, o sistema que leva os equipamentos em segurança a esse estado é chamado de *trip*. O tempo que o sistema leva para sair da região limítrofe entre os estados "normalidade" e "distúrbio" para o estado de "desligado" é o tempo que o operador tem para corrigir os problemas no processo.

Na Caldeira de Recuperação da WestRock, ocorrem, em média, 3.398 alarmes diariamente. Tal quantidade está muito acima do aceitável para a seguradora da empresa e também do número definido pela ISA 18.2. A *International Society of Automation* (ISA) possui um comitê para estabelecer boas práticas para sistemas de alarmes, o comitê 18, *Instrument Signals and Alarms*. Esse comitê possui o padrão 18.2 específico para gerenciamento de sistemas de alarmes em plantas industriais, o qual estabelece que um sistema de alarmes satisfatório deve ter aproximadamente 150 ocorrências de alarmes por dia, estipulando o número de 300 alarmes diários como o valor máximo gerenciável [22]. Esses números indicam que os alarmes da caldeira de recuperação possuem problemas severos em sua implementação e definição de seus valores de disparo.

A [Figura 10](#) ilustra como o sistema de alarmes da caldeira está configurado. Os alarmes, ilustrados na figura como x, estão definidos dentro da área de operação normal, o que provoca a emissão de notificações desnecessárias e sem sentido ao operador desse equipamento. Dessa maneira, o sistema de alarmes da caldeira não é utilizado, pois o operador não considera seus avisos preciosos para seu trabalho. Na maioria das vezes, as notificações são silenciadas sem um cuidado maior em verificar suas causas e o único uso para os alarmes é buscar em seu histórico a causa raiz de um problema que causou o desligamento da caldeira. Portanto, como objetivo do trabalho é colocar a maior quantidade possível de alarmes na região limítrofe entre a normalidade e distúrbio da [Figura 10](#).

Nas diretrizes presentes no guia EEMUA 191 [14], é proposto o seguinte nivelamento de performance para um sistema de alarmes:

- Nível 1 - Sobrecarregado: alta ocorrência de alarmes e mínima confiabilidade no sistema de alarme;
- Nível 2 - Reativo: há considerável melhora no número de ocorrências, porém *bad-actors* são responsáveis pela maioria das ocorrências. Além, disso, avalanches de

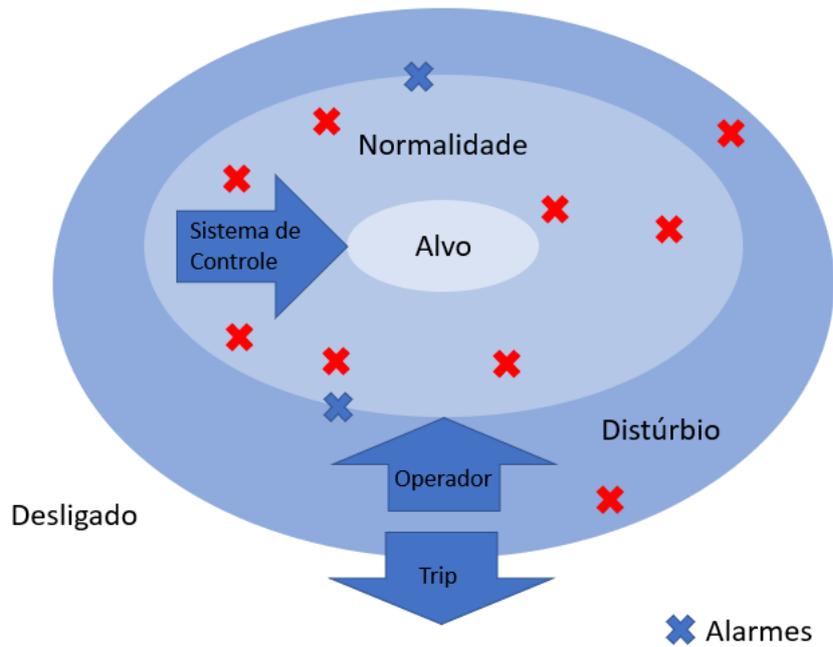


Figura 10 – Funcionamento do sistema de alarmes quando mal sintonizado. Fonte: Adaptado de Logique Sistemas [5]

alarmes ainda são inevitáveis em situações de distúrbio;

- Nível 3 - Estável: poucos problemas em relação aos *bad-actors*, porém, em situações de distúrbio, a taxa de ocorrência de alarmes ainda é muito alta;
- Nível 4 - Robusto: não há problemas com *bad-actors* e avalanche de alarmes em momentos de distúrbios;
- Nível 5 - Preditivo: o sistema de alarmes prevê o futuro estado da planta e aumenta o tempo disponível para a realização de modificações no processo, possibilitando a redução de danos.

Baseado nesses cinco níveis de performance, podemos definir o sistema de alarmes da caldeira de recuperação da WestRock como estando no nível 1, ou seja, sobrecarregado. Portanto, é imprescindível que mudanças sejam realizadas nesse sistema, para que, no futuro, se atinja um mínimo de confiabilidade e ele deixe de ser subutilizado. Outro problema enfrentado pelo sistema de alarme da caldeira é a sua priorização. A EEMUA 191 dispõe que a correta definição das prioridades dos alarmes é essencial para que, em períodos de crise, o operador consiga escalonar suas atividades a fim de contornar os problemas apresentados. A EEMUA indica a seguinte distribuição: 5 % dos alarmes devem ter prioridade "alta", 15 % devem ter prioridade "média" e 80 % devem ter prioridade baixa [14]. Entretanto, a Figura 11 mostra que, na WestRock, a realidade é diferente. Os alarmes da caldeira, em sua maioria, tem prioridades "alta"(2) ou "muito alta"(1), 65,2 %

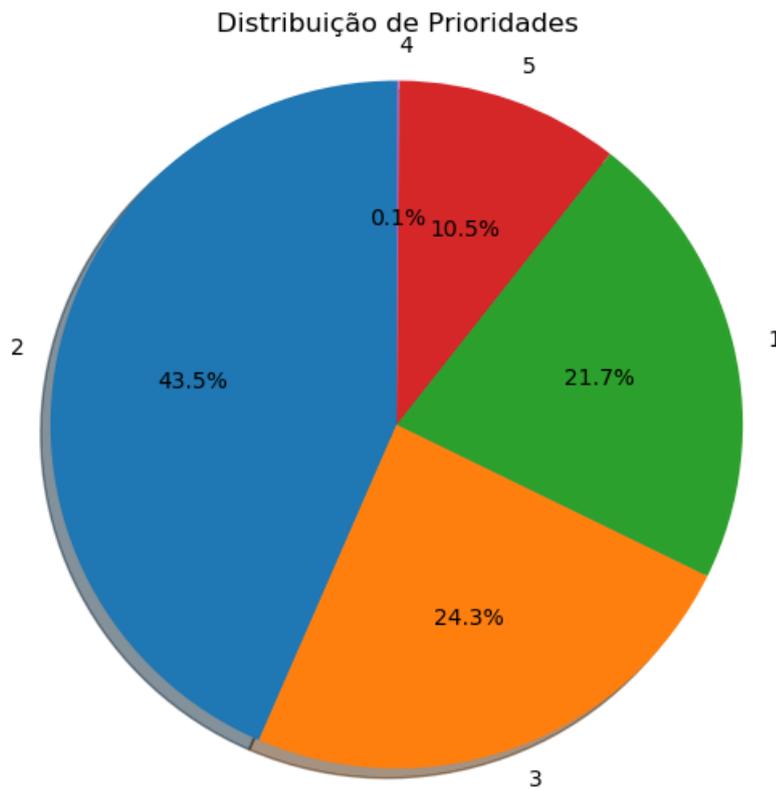


Figura 11 – Distribuição das prioridades dos alarmes da caldeira de recuperação.

do total de alarmes. Em seguida, temos os alarmes com prioridade "média"(3) e, por fim, os de prioridade "baixa"(4) e "muito baixa"(5), representando 10,6 % do total de alarmes, tratando-se do oposto do que é considerado ideal pela EEMUA. Com base no contexto descrito acima, se descreverá na sequência o problema abordado no projeto.

## 2.5 Descrição do problema

Embora o sistema de segurança de um equipamento seja essencial, o sistema da Caldeira de Recuperação da WestRock apresenta muitas disfunções. Portanto, os problemas tratados neste trabalho podem ser subdivididos em três eixos principais, conforme descrito a seguir.

### 2.5.1 Relatos de Incidentes

- Muitas informações são perdidas durante o fluxo da informação, pois o processo é todo manual e a informação é mantida armazenada em anotações em papel, o que possibilita o extravio do relato;
- Há um grande número de pessoas envolvidas no processo de comunicação desnecessariamente;

- Há um intervalo de tempo muito grande, em torno de cinco dias, para que o supervisor receba os relatos realizados pelo operador;
- O operador não recebe *feedback* quando o Supervisor toma uma ação para a resolução do problema relatado. A comunicação, portanto, é unilateral.

### 2.5.2 Sistema Supervisório

- O sistema supervisório e o sistema de controle não estão plenamente integrados. Há muitas informações, presentes no sistema de controle, que não estão no sistema supervisório;
- O sistema supervisório é utilizado de maneira passiva, ou seja, apresenta apenas uma visão geral dos equipamentos da caldeira e pode ser utilizado para a busca de causas raízes de incidentes no equipamento. Entretanto, não alerta a Supervisão, por meio de notificações, os possíveis problemas que ocorrem na planta.

### 2.5.3 Sistema de Alarmes

- O número diário de incidência de alarmes está muito acima do proposto pela ISA e seguradora, impossibilitando a confiabilidade no sistema;
- As nomenclaturas dos alarmes não possibilitam, ao operador, uma boa identificação do problema enfrentado;
- A distribuição de prioridades dos alarmes está em desconcontro com o sugerido pela EEMUA 191;
- Os alarmes não estão configurados adequadamente, uma vez que não alertam o operador sobre um evento de distúrbio. Muitas vezes, os alarmes ocorrem mesmo estando a caldeira em sua operação normal;
- O sistema de alarmes não apresenta a confiabilidade desejada e, portanto, é subutilizado pela equipe de operação da caldeira;
- O tempo de tomada de decisão por parte da Supervisão e Operação é reduzido e impossibilita a correta tratativa de alguns problemas.

## 2.6 Conclusão

A indústria de papel e celulose tem grande importância na economia brasileira, consistindo em fonte de matéria prima para confecção de muitos bens de consumo, sendo sustentável e ecologicamente correta. O principal meio de obtenção de celulose é o processo

Kraft. Esse processo é muito utilizado nesse setor industrial, pois, além de resultar em um produto de qualidade, permite que seus componentes químicos sejam recuperados e utilizados novamente no processo.

A caldeira de recuperação é o principal equipamento desse processo, possui o maior custo para compra e construção e é essencial para a geração de vapor. Com o vapor gerado por ela, é possível aumentar a participação da co-geração de energia na matriz energética da fábrica e diminuir os custos de produção da celulose. Porém, sua operação, por trabalhar com vasos e componentes altamente pressurizados, necessita de um bom sistema de segurança, com manutenções e auditorias sendo feitas regularmente.

Nos próximos capítulos, serão apresentadas as ferramentas utilizadas no projeto para gerenciar e prever os alarmes da caldeira, os dispositivos e processos utilizados na caldeira de recuperação da WestRock para conduzir a operação desse equipamento de maneira segura e o software utilizado para a automação dos Relatos de Incidentes. Será mostrado, também, como um projeto de automatização do sistema de segurança da caldeira pode melhorar a obtenção de informações do processo, possibilitando a manutenção preditiva dos equipamentos e a identificação das causas raízes das falhas apresentadas. Além da redução do tempo para condução de informação de falhas e incidentes e, também, aumento no engajamento dos funcionários.

## 3 Fundamentação teórica e ferramentas utilizadas

Nesse capítulo, será apresentada a fundamentação teórica e serão descritas as ferramentas necessárias para a execução do projeto. Na Seção 3.1 e Seção 3.2, será explicitada a fundamentação teórica necessária para a gestão dos alarmes da caldeira e para a predição desses eventos. Na Seção 3.3, discorre-se sobre os atributos do sistema de controle distribuído utilizado na WestRock, o *Foxboro I/A Series*, especificamente sobre o seu sistema de alarmes. A Seção 3.4 apresenta o sistema supervisor utilizado pela equipe de supervisão do Departamento de Recuperação e Utilidades (DRU), denotando como esse *software* é utilizado e quais são as potenciais funcionalidades que podem ser aproveitadas. Por fim, na Seção 3.5, é exposto o *Powerapps*, ferramenta criada pela *Microsoft* e utilizada pela WestRock para desenvolvimento de sistemas empresariais.

### 3.1 Gestão dos alarmes

Conforme descrito nos capítulos anteriores, o sistema de alarmes da Caldeira de Recuperação da WestRock está subutilizado pelos seguintes motivos: (a) há um excesso de alarmes ocorrendo diariamente; (b) a nomenclatura dos alarmes não são claras e dificultam o entendimento do problema por parte do operador; e (c) as prioridades dos alarmes estão mal definidas, dificultando o escalonamento das ações a serem tomadas pelo operador para resolução dos problemas no equipamento. Portanto, é necessário o gerenciamento dos alarmes para trazer confiabilidade ao sistema.

ARAÚJO 2010 [23] define algumas análises que podem ser realizadas a fim de determinar os problemas presentes em um sistema de alarmes:

- Contagem de alarmes diários;
- Frequência de ocorrência de alarmes;
- Detecção e contagem de alarmes contínuos;
- Taxa de pico de alarmes;
- Distribuição de prioridades de alarmes;
- Distribuição de alarmes por área;
- Detecção de alarmes correlacionados;

- Classificação do sistema de alarme.

Além dessas análises, a EEMUA [14] propõe a verificação do número de ocorrência de cada alarme para que, assim, seja possível a identificação dos alarmes problemáticos, chamados de *bad-actors*.

### Histórico de Alarmes

O histórico de alarmes, em geral, é a primeira análise realizada e pode ser representado por meio de um gráfico de barras. Por meio dele, é possível verificar os períodos nos quais o equipamento apresentou maior ocorrência de alarmes e definir se essa característica está condizente com o momento. É possível verificar, também, qual alarme ocorreu mais vezes em um mesmo mês, dia e até hora. Com essa análise, é possível verificar se o número de alarmes diários está sendo reduzido.

A contagem de *bad-actors* é realizada nessa etapa. A norma EEMUA 191 [14] define que a distribuição de alarmes se assemelha a uma exponencial decrescente, em que os vinte alarmes mais frequentes são responsáveis por 80 % das ocorrências. Reduzir a ocorrência desses alarmes possibilita melhorar drasticamente a quantidade de alarmes que aparecem ao operador diariamente. Para melhor representar os *bad-actors*, pode-se criar um gráfico de Pareto, no qual as ocorrências são elencadas da maior para menor, com a inserção de uma linha representando o acumulado total.

### Distribuição de Prioridades

O sistema de alarmes deve ser configurado corretamente, de modo que permita uma boa priorização. Ou seja, é necessário colocar os alarmes mais importantes com uma prioridade mais alta que os de menor importância. Assim, o operador pode identificar quais ações deve realizar primeiro para solucionar os problemas do equipamento com maior eficiência e segurança. Em um cenário de avalanche, onde muitos alarmes ocorrem no mesmo período de tempo, a dificuldade de priorizar as atividades fica mais evidente.

O número de alarmes de baixa prioridade deve ser maior que o número de alarmes de alta prioridade [24]. A EEMUA 191 sugere que 5 % dos alarmes sejam de alta prioridade, 15 % de média prioridade e 80 % de baixa prioridade [14], pois é difícil de saber qual problema atacar quando todos apresentam uma alta prioridade.

### Análise de Tempo de Vida

O tempo de vida é o lapso temporal transcorrido entre o surgimento do alarme e a solução do problema por ele alertado. Verificar o tempo médio de vida de um alarme é essencial para identificar qual tipo de ação corretiva deve ser tomada. Se o tempo médio for muito elevado, podemos classificar o alarme como contínuo. Geralmente, alarmes contínuos ocorrem quando um equipamento está em manutenção e o alarme referente a ele não é inibido, ocasionando em um alerta constante de mal funcionamento. Por outro lado, se

o tempo de vida médio for muito curto, temos uma má configuração dos parâmetros de disparo e a esse tipo de alarme damos o nome de *chattering*. Para esse caso, o *setpoint* de disparo pode estar localizado na região de funcionamento normal do equipamento ou não foram levadas em consideração as perturbações do sistema em sua concepção, ou seja, o mínimo ruído da variável medida ocasiona em disparo do alarme. A resolução desses dois casos será tratada mais adiante nessa mesma seção.

### **Análise de Avalanche**

Em uma planta industrial, vários processos estão interconectados. Portanto, um problema que ocorre em um processo inicial, gerando um alarme, pode se propagar para processos posteriores. Cada etapa pode gerar seus próprios alarmes e, assim, a propagação da falha pode levar à geração de centenas ou até milhares de alarmes para o operador. Esse período de grande volume de ocorrência é chamado de período de avalanche [24].

Um sistema de alarmes configurado dessa maneira faz com que apenas um problema acarrete na geração de diversos alarmes. O operador nesse período, pelo excesso de alarmes, tem dificuldade de encontrar o problema raiz. Portanto, o ideal seria que apenas essa causa geradora fosse apontada pelo sistema. Como isso não ocorre na prática, fica a cargo do operador correlacionar todos os alarmes de maneira a identificar a causa provável da avalanche.

ARAÚJO [24] define que o cálculo do período de avalanche pode se dar ao deslizar uma janela de tempo no período analisado e ao verificar o número de alarmes ativos dentro dessa janela. Caso o número de alarmes ultrapasse o limite superior pré-estabelecido, tem-se o início do período de avalanche. O período encerra-se quando o número de ocorrência reduz aquém do limite inferior pré-estabelecido.

### **Análise de Alarmes Correlacionados**

A análise de alarmes correlacionados é importante para verificar qual alarme identifica o problema gerador de outros alarmes. Além disso, é nessa análise que verificamos a existência da duplicidade de alarmes acerca do mesmo problema. Nela, leva-se em consideração um alarme central e verifica-se, a partir dele, quais alarmes sucederam-no. Portanto, é difícil de realizar essa análise quando temos um sistema de alarmes sobrecarregado, no qual inúmeros alarmes ocorrem simultaneamente sem, necessariamente, terem relação entre si.

### **Análise de Tempo de Reconhecimento**

O tempo de reconhecimento é o período compreendido entre o surgimento do alarme para o operador e o seu reconhecimento. É uma análise importante para verificar se o trabalho do operador está sendo efetivo e se ele está atento ao sistema e suas perturbações. No historiador é salva a informação acerca do momento em que houve o reconhecimento ou *acknowledge* do alarme, como pode ser verificado na [subseção 3.3.1](#), o que facilita a

realização dessa análise.

### 3.1.1 Correção de Alarmes

Existem algumas maneiras diferentes para corrigir um alarme problemático. Cada uma dessas maneiras corrige um tipo distinto de problema. Alarmes contínuos que surgem porque seu respectivo equipamento está desativado podem ser ajustados por meio de um intertravamento. Quando o sinal referente ao estado do equipamento for desligado, desativa-se o alarme. Assim, por exemplo, alarmes indicando corrente ou velocidade baixa deixarão de existir quando o equipamento estiver parado.

Para alarmes duplicados, a alternativa de resolução é encontrar qual das suas versões apresenta os melhores parâmetros de disparo. Depois, excluem-se os outros alarmes referentes ao mesmo problema. Já para alarmes mal configurados, deve-se analisar cuidadosamente os pontos de operação do equipamento, principalmente a faixa nominal de operação, para se definir, então, os melhores *setpoints* de disparo.

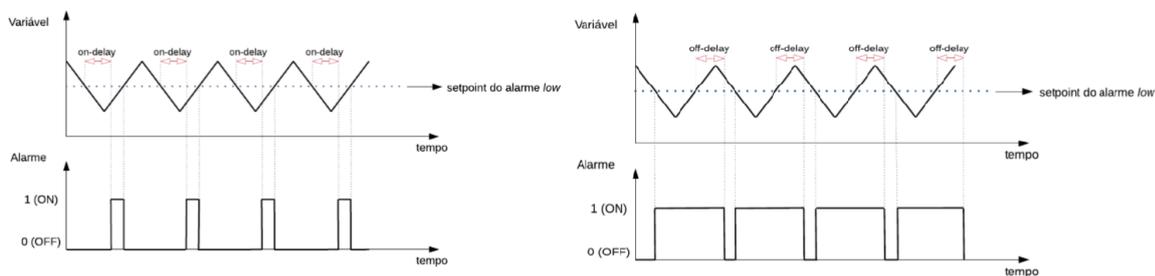
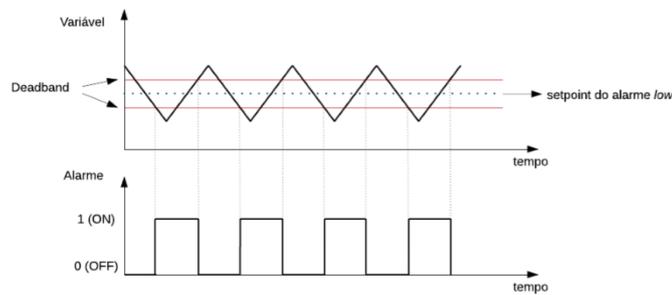


Figura 12 – Representação do *on-delay* e *off-delay* [6]

Para alarmes que são ativados por ruídos ou pequenas variações na planta, COTRE-RAS [6], em seu trabalho, define duas possíveis soluções, o uso de *delay* ou de *deadband*. O *delay* pode ser de dois tipos: *on-delay* ou *off-delay*. No primeiro caso, o alarme precisa permanecer acionado por um período determinado de tempo, antes que ele apareça entre os alarmes ativos do sistema. Já no *off-delay*, o alarme deve permanecer inativo por um período pré-determinado para que, então, deixe de aparecer na lista de alarmes ativos. Os *off-delays*, em geral, são preferidos, pois o alarme continua na tela da supervisão até que o problema seja resolvido. Entretanto, quando picos na variável medida são considerados normais na operação do equipamento, o uso de *on-delays* é uma boa solução para *chattering* alarmes. A Figura 12 ilustra a diferença entre esses dois tipos diferentes de *delay*. Por fim, *deadband* ou banda-morta é a faixa de valores definidos próximos do *setpoint* no qual o estado do alarme permanece inalterado. A Figura 13 ilustra essa situação de zona morta.

Figura 13 – Representação do *deadband* [6]

## 3.2 Mineração de dados e Aprendizado de Máquina

Os sistemas supervisórios atuais são capazes de armazenar uma grande quantidade de dados relevantes ao processo. Entretanto, dependem da maneira com a qual são apresentados, para que o usuário possa compreender problemas, melhorar processos ou gerenciar manutenções. Portanto, como proposta desse projeto, pretende-se utilizar os valores de vários sensores presentes na caldeira, em conjunto com o histórico de alarmes, para prever, por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, possíveis falhas no equipamento. A extração de informações úteis, a partir de grandes bases de dados, é chamada de mineração de dados (MD) [25].

Ao contrário de outros métodos, como a construção de modelos fenomenológicos, o uso de tecnologias de reconhecimento de padrão reduz a complexidade da avaliação dos problemas e não necessita de um conhecimento profundo sobre cada equipamento da caldeira, embora, em um passado recente, o uso da computação para resolução de problemas tão complexos quanto o sugerido pelo aprendizado de máquina não fosse possível, pois não havia componentes eletrônicos capazes de fornecer capacidade de processamento suficiente. Hoje, com o avanço da computação, a resolução de tais problemas já é possível, até mesmo com o auxílio de computadores pessoais. Com essa ferramenta, é possível definir um sistema em caixa-preta, onde não é necessário o conhecimento exato de suas particularidades.

Alguns autores buscaram, por meio dos métodos de classificação, prever falhas em equipamentos. BRAUNSTEIN et al. [26] utilizou árvores de regressão e classificação não supervisionada para a predição de alarmes em uma usina hidrelétrica. CORNELLI [25], em seu Projeto Final de Curso, utilizou uma máquina de vetor de suportes para prever alarmes em aerogeradores, na qual construiu um modelo único capaz de classificar os dados das turbinas em cada um dos alarmes propostos. COELHO et al. [27] propõe um sistema iterativo para diagnóstico de falhas no setor elétrico brasileiro com o auxílio de Redes Bayesianas. PALHARES et al. [28] também utilizou Redes Bayesianas para a decisão no processo de manutenção preventiva de transformadores. LISEHROODI, MUDA e

YASSI [29] utilizaram um *framework* baseado em *Perceptron* Multicamada e clusterização K-Médias para detecção de invasores em uma rede de comunicação. Por fim, SHAH, GHAZALI e NAWI [30] também utilizaram redes de *Perceptron* Multicamada para prever terremotos. Os autores dos trabalhos referenciados demonstram o quão variadas podem ser as aplicações de métodos de aprendizado e classificação na predição de falhas e problemas.

Existem técnicas que descrevem como deve ocorrer a aplicação de um método de mineração de dados: um deles é o *Cross-Industry Standart Process of Data-Mining* (CRISP-DM). Essa metodologia descreve em seis passos como deve ocorrer o projeto, a avaliação e a implementação da mineração de dados [31]:

1. **Entendimento do Negócio:** Define-se o objetivo que se deseja atingir com a MD. É necessário converter o problema de negócio em um problema computacional e traçar um plano de ação para atingir os objetivos definidos anteriormente;
2. **Entendimento de dados:** Nesse passo, familiariza-se com os dados do problema, verificando-se suas qualidades e quais informações eles podem trazer;
3. **Preparação dos dados:** Faz-se a filtragem dos dados, a retirada de valores problemáticos e pode-se reduzir sua dimensionalidade;
4. **Modelagem:** Nessa fase, os dados são inseridos em um algoritmo para a construção de um modelo composto por variáveis explicativas;
5. **Avaliação:** Momento em que é avaliado e revisto os passos executados para verificar se o modelo matemático alcança os objetivos definidos;
6. **Implantação do modelo:** o conhecimento aprendido é organizado, apresentado e aplicado no contexto desejado.



Figura 14 – Regressão e Classificação [7]

Existem diferentes técnicas de aprendizagem de máquina. A aprendizagem supervisionada utiliza um conjunto de dados previamente rotulados para criar um modelo ótimo. Esse modelo deve, posteriormente, ser capaz de prever rótulos de dados não previamente

classificados. Se o rótulo em questão for um número real, damos a esse procedimento o nome de regressão. Caso o rótulo seja discreto, finito e não ordenado, o processo é chamado de classificação. A diferença entre regressão e classificação pode ser visualizada na [Figura 14](#). No aprendizado não-supervisionado, não há o pré rotulamento dos dados, ou seja, há menos informações sobre eles. É necessário, portanto, detectar as similaridades entre os objetos e agrupá-los apropriadamente. Já a aprendizagem semi-supervisionada combina os dois problemas anteriores: dados rotulados e não-rotulados. Por fim, existe a aprendizagem por reforço que se distingue dos métodos anteriores por não apresentar um conjunto de treinamento. Nesse caso, agentes de *softwares* são colocados no ambiente estudado e, por meio de recompensa cumulativa, determina-se a melhor maneira de resolver o problema.

### 3.2.1 Perceptron Multicamadas

O *Perceptron* é um modelo computacional que se baseia nos princípios de funcionamento de um neurônio biológico e é a unidade fundamental para funcionamento de uma rede neural [32]. A [Figura 15](#) apresenta como se dá a estrutura desse neurônio artificial e como ele é subdividido.

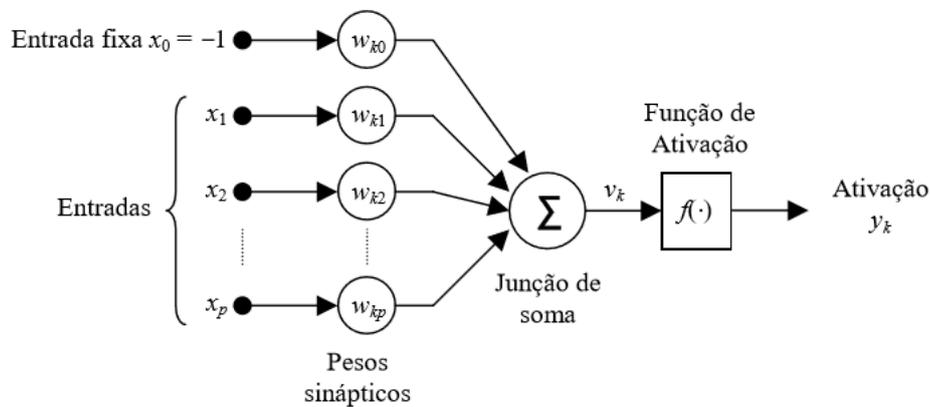


Figura 15 – Estrutura do *Perceptron* [8]

As entradas do modelo, também chamadas de sinapses, são definidas pelo vetor  $x = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_p]$ . Cada uma dessas entradas é multiplicada por um peso sináptico, elementos do vetor  $w = [w_{k0}, w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kp}]$ . Quando há a ocorrência da entrada fixa ( $x_0$  na [Figura 15](#)), o peso sináptico correspondente a essa entrada é chamado de peso de polarização. Posteriormente, os valores são unidos por uma junção soma e resultam na expressão:

$$v_k = \sum_{i=1}^p w_{ki}x_i. \quad (3.1)$$

Por fim, a expressão  $v_k$  passa por uma função de ativação, caracterizada por sua não-linearidade. Essa função é responsável por limitar o sinal de saída para um intervalo, seja ele  $(0, 1)$  ou  $(-1, 1)$ . A saída da função de ativação pode ser representada pela equação:

$$y_k = f(v_k). \quad (3.2)$$

Vários tipos diferentes de função podem ser utilizados como função de ativação, entre eles as funções: degrau, sigmoide, *Heaviside*, linear por partes, tangente hiperbólica e *softmax*. Porém, a mais utilizada é a função sigmoide, que pode ser expressada por:

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}}, \quad (3.3)$$

em que  $a$  o parâmetro de inclinação da função sigmoide. Quando  $a$  tende ao infinito, temos uma aproximação da função para a função degrau. Quando é desejável que a função sigmoide tenha valores limitados em  $(-1, 1)$ , usamos a expressão de tangente hiperbólica, definida por:

$$f(v) = \tanh\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1 - e^{-v}}{1 + e^{-v}}. \quad (3.4)$$

Entretanto, um *Perceptron* só é capaz de separar o espaço de entradas em duas regiões, sendo que a curva de separação é uma linha reta [8]. Portanto, não é possível classificar problemas não-lineares apenas com um desses neurônios. Para resolver tais problemas, existem as redes de *Perceptron* Multicamadas, conhecida em inglês por *Multi-Layer Perceptron* (MLP).

O *Perceptron* Multicamadas é constituído por uma rede de *Perceptrons* em que o vetor de entrada  $x$  é conectado na camada inicial e os valores de saída dos neurônios são conectados na camada seguinte. Essa conexão de neurônios ocorre até a última camada que, então, provê o resultado da rede neural. A Figura 16 ilustra um *Perceptron* Multicamadas, na qual cada círculo representa um neurônio como o descrito anteriormente. Com os neurônios agrupados dessa maneira, é possível resolver problemas muito mais complexos e de classificação não-lineares.

Para que a rede neural funcione, é necessário treiná-la. Para o treinamento, é possível utilizar o aprendizado supervisionado. Nele, é inserido uma amostra de dados, já com um rótulo identificando sua classificação. Assim, é possível fazer com que a rede aprenda padrões, de modo que, quando uma amostra desconhecida for inserida, ela seja capaz de reconhecer a qual classe esses dados pertencem. Portanto, nesse processo, os parâmetros da rede neural são adaptados por estímulos do meio ambiente onde a rede está inserida [32].

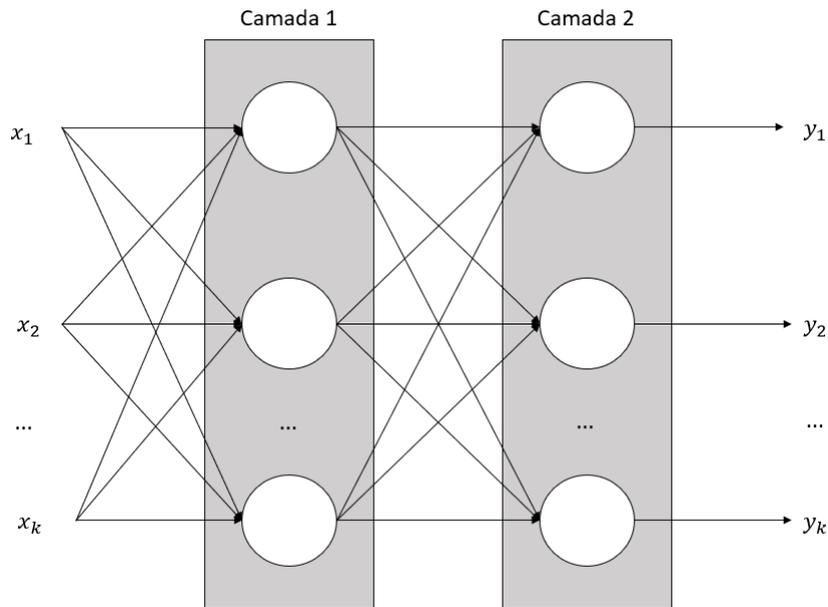


Figura 16 – Estrutura da rede de *Perceptron* Multicamada

Um dos métodos utilizados para implementar nas redes de *Perceptron* Multicamadas o aprendizado supervisionado é a retro-propagação dos erros ou, em inglês, *backpropagation*. Com esse método, o erro entre o predito e o valor real é calculado e iterativamente se corrigem os pesos sinápticos da rede neural. Portanto, se o valor real de classificação na iteração  $i$  é  $z_k(i)$  e o predito é  $y_k(i)$ , o erro associado a rede será descrito por:

$$e_k(i) = z_k(i) - y_k(i). \quad (3.5)$$

O aprendizado de máquina vai, portanto, minimizar a função custo associado ao erro de predição da rede. Podemos, então, classificar esse processo como um problema de otimização não-linear.

Sendo assim, o algoritmo de *backpropagation* consiste em iniciar os pesos sinápticos com valores aleatórios. Como o algoritmo possui os valores esperados de saída, é calculado o erro. Por meio do erro, calcula-se a função custo, sendo importante que ela seja diferenciável, e, para minimizar essa função, é calculado o seu gradiente. Nesse projeto, o gradiente é representado pela matriz Hessiana, que contém as derivadas de segunda ordem para uma função com  $n$  variáveis e é muito utilizada para resolução de problemas de otimização. Esse método de otimização que utiliza a matriz Hessiana é chamado de *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno* (BFGS). Há também outro algoritmo, utilizado em computadores com pouca memória, onde utiliza-se apenas alguns vetores para representar, de maneira implícita, a matriz total, o LBFGS.

Como o gradiente fornece a direção de maior crescimento da função e o nosso

objetivo é minimizar o erro, utilizamos a direção oposta desse vetor. De maneira generalista, podemos descrever essa propagação por:

$$w_k(i) = w_k(i - 1) - \eta g_k, \quad (3.6)$$

onde  $\eta$  é a taxa de aprendizado e  $g_k$  o gradiente da função custo. Iterativamente os pesos são recalculados, até que o erro esteja abaixo de um valor pré-estabelecido ou o número de iterações ultrapasse o valor definido.

### 3.3 Foxboro I/A Series

O *Foxboro I/A Series* é um conjunto de softwares utilizados para controle remoto de dispositivos, implementação de controladores e supervisão de dados do sistema em tempo real. Esse software é utilizado como principal Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) e é onde as malhas de controle PI e PID da fábrica estão implementadas. É um sistema capaz de trabalhar com todas as redes disponíveis na empresa – Modbus, PROFIBUS, HART e Mesh – e que possui grande integração com o hardware, já que são desenvolvidos pela mesma empresa *Schneider Electric*.

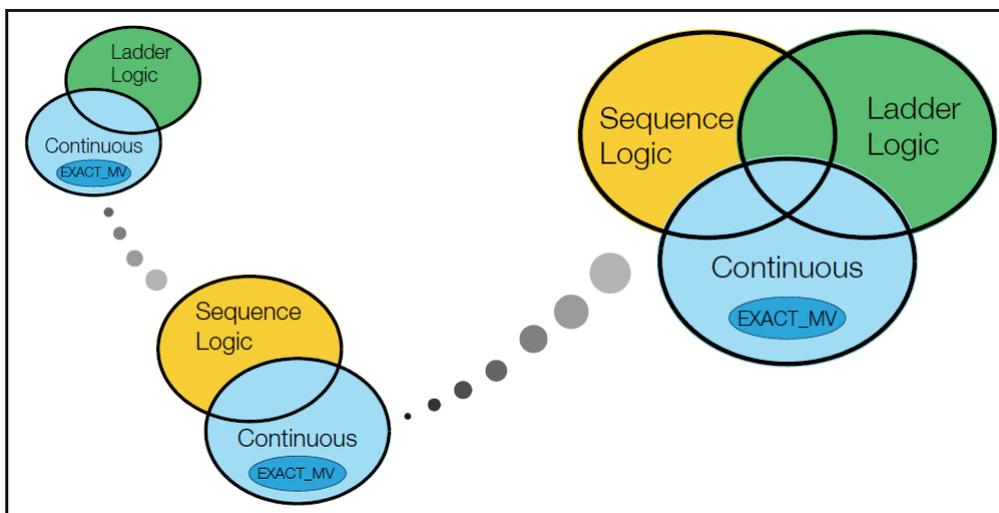


Figura 17 – Controladores disponíveis no *Integrated Control Configurator* [9].

Os principais módulos, utilizados no projeto, do *Foxboro I/A Series* são o *Integrated Control Configurator* (ICC), *Foxboro Draw* e *Foxboro View*. O *Integrated Control Configurator* utiliza diagramas de bloco para interconectar sensores, controladores e atuadores de maneira simplificada para desenvolvimento de malhas de controle. Esse módulo é responsável por acessar as redes industriais e nele é possível implementar controladores contínuos como P, PI e PID, lógicas sequenciais de funcionamento de equipamentos, cálculos e intertravamentos. A Figura 17 ilustra os três tipos de usos dos controladores no software,

a lógica Ladder unida com um controle contínuo, um controle por sequência lógica e um controle contínuo ou os três tipos de controle sendo usados juntos, sequência lógica, controle contínuo e lógica Ladder.

No ICC, os blocos mais utilizados:

- *Analog Input Block* (AIN): recebe a entrada analógica de um único ponto e converte em uma forma adequada para uso pela estratégia de controle do I/A Series;
- *Analog Output Block* (AOUT): provê o sinal para o atuador, dada a estratégia de controle utilizada. Com esse bloco é possível impor limites superiores e inferiores, escalonamentos e bias ao sinal de controle;
- *Real Input* (RIN): semelhante ao bloco AIN, o RIN recebe uma única entrada analógica, porém recebe os dados oriundos da rede HART e os adequa para uso no Foxboro;
- *Real Output* (ROU): é a contraparte para as saídas de controle do bloco RIN e é utilizado para equipamentos conectados via protocolo HART;
- *Advanced Calculator* (CALCA): permite a utilização de funções lógicas e aritméticas em um único ambiente. Permite a utilização de múltiplas entradas e saídas, sendo elas booleanos, números reais ou inteiros. Na figura 3.5, são ilustradas todas essas entradas e saídas que existem no bloco;
- *Advanced PID Block* (PIDA): permite a implementação de controladores P, I, PD, PI, PID e PIDTAU em malha fechada e controladores feed-forward aditivos e multiplicativos. Suas principais entradas são a variável medida e o ponto de operação desejado. Por meio dos valores de entrada, calcula o valor da variável manipulável, baseado nos parâmetros de banda proporcional, ganho integrativo e derivativo inseridos.
- *Boolean Alarm Block* (BLNALM): permite que seja gerada uma mensagem de alarme para até oito entradas booleanas. Para cada entrada, é possível inserir uma descrição e estado ao entrar ou sair do alarme;
- *Measurement Alarm Block* (MEALM): tem o papel de um anunciador de alarme. Assim, pode-se ativar o mecanismo de alarme do *I/A Series* quando a fonte de informação é externa ou o bloco utilizado não apresenta uma função geradora de alarme, como, por exemplo, o bloco de sequência. Por meio desse bloco, é possível configurar, também, os parâmetros de disparo: muito baixo, baixo, alto e muito alto;
- *Pattern Alarm Block* (PATALM): provê uma máscara, comparação de bits e capacidade de alarme para um padrão específico de até dezesseis entradas booleanas;

- *Real Alarm Block* (REALM): disponibiliza alarmes que podem ser uma combinação entre desvio, "alto"/"baixo" e "muito alto"/"muito baixo" absoluto ou uma taxa de mudança para uma única entrada real. Também, no bloco, há um indicador booleano para cada tipo de alarme. O REALM tem como função gerar alarmes e retornar ao normal as mensagens para cada evento desejado;
- *State Alarm Block* (STALM): assim como o MEALM, tem como papel ativar o mecanismo de alarme do *I/A Series* quando a fonte de informação é externa ou o bloco utilizado não apresenta uma função geradora de alarme, como, por exemplo, o bloco de sequência. A única diferença, perante o bloco MEALM, é o uso de diferentes estados para descrever uma operação normal ou em falha.

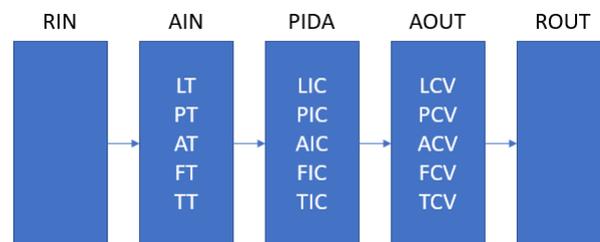


Figura 18 – Diagrama de controle na rede HART. Fonte: elaborada pelo autor

De maneira geral, os blocos RIN, AIN, AOOUT e ROOUT são conectados em série quando há a necessidade do uso de rede HART, como ilustrado na [Figura 18](#). Há uma grande flexibilidade na configuração dos blocos, tendo em vista que estes podem ser organizados em série e em paralelo. Além disso, a saída de um bloco pode ser conectada na entrada de múltiplos blocos, considerando que as entradas e saídas possuem o mesmo formato de representação.

O *Foxboro View* é o software que faz o interfaceamento entre o processo e o operador. Nele, é possível interagir com plantas de tempo real, campos de inserção de informação e dados de processo. Também, é possível configurar eventos que disparam alarmes, criar ambientes de operação específicos para cada tipo de usuário (operação, manutenção e engenheiros) e disponibilizar gráficos de tendência de cada variável presente do processo.

O *Foxboro Draw* é o software que permite a fácil edição da interface gráfica para uso no *Foxboro View*. Nele, é possível criar telas para visualização e nelas inserir imagens e desenhos da planta, da área do processo e de dispositivos específicos. Na [Figura 19](#) está ilustrada uma tela criada no *Foxboro Draw*, essas telas podem ser configuradas de maneira a permitir a interação do operador com o processo, movendo objetos ou digitando valores de entrada. Os “objetos” são descritos na plataforma como objetos primitivos – como linhas, retângulos, círculos e texto –, bibliotecas de objetos e bitmaps. As bibliotecas de objetos podem ser os objetos fornecidos pela Foxboro e símbolos criados pelo usuário.

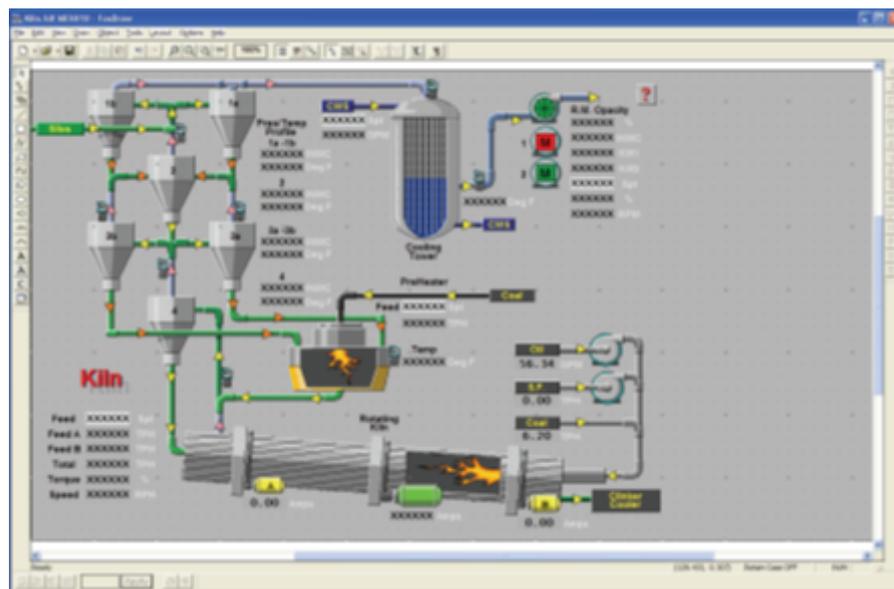


Figura 19 – Exemplo de desenvolvimento de tela no Foxboro Draw [9].

### 3.3.1 Sistema de Alarmes

O sistema de alarmes da *Foxboro I/A Series* consiste em notificações visuais e sonoras que surgem para o operador quando uma variável de processo atinge patamares definidos. Os alarmes podem ser divididos em cinco prioridades, que são identificadas pelos números de "1" a "5", sendo "1" a prioridade mais alta. Porém, além das prioridades, existem outras informações que podem ser disponibilizadas ao sistema de alarmes, como por exemplo:

- Alarme de nível, sendo ele "muito baixo", "baixo", "alto" e "muito alto";
- Alarme de desvio da variável medida, "baixo" e "alto";
- Inibição de alarme para intertravamento. Essa função é utilizada para um alarme não continuar soando mesmo com o equipamento desligado, por exemplo;
- Tipo de aviso sonoro, intermitente, contínuo ou nenhum;
- Informação de reconhecimento.

Todos os alarmes necessitam de uma ação do operador para inibir seu som e sua indicação visual. Essa ação é chamada de reconhecimento e, em teoria, incentiva o operador para que esse visualize a tela de comando e verifique a situação atual do equipamento. Posteriormente, o alarme entra para uma fila de ocorrências e pode ser verificado, futuramente, a data do incidente.

O sistema de alarme da caldeira de recuperação foi desenvolvido na construção do equipamento e, desde então, poucas modificações foram realizadas. As prioridades não

foram definidas seguindo uma metodologia de gestão de alarmes. Além disso, os níveis nos quais os alarmes são ativados ainda estão correlacionados às antigas características do equipamento e não levam em consideração as duas modificações que houveram na caldeira. Atualmente, esse sistema não é utilizado pela operação de maneira a antever problemas. A única função para os alarmes é verificar o evento causador de anormalidades na caldeira por meio do seu histórico de ocorrências que fica disponível para operador.

### 3.4 PI System

*Plant Information System*, comumente chamado de PI System, é uma plataforma da empresa *OSIsoft* capaz de coletar, armazenar, visualizar e compartilhar grandes quantidades de informações sobre plantas industriais com pessoas e dispositivos de toda a operação. Toda essa infraestrutura tem como objetivo criar históricos de funcionamento dos equipamentos, fornecer análises sobre falhas e simplificar a visualização de dados no ambiente fabril. O software trabalha tanto com dados fornecidos por entradas manuais, quanto com dados fornecidos pelo *Foxboro I/A System*.

Assim como a rede que controla os processos, o sistema de supervisão do *PI System* é redundante, cada departamento na fábrica possui ao menos dois servidores de dados. Os dados são posteriormente armazenados em servidores centralizados e distribuídos por toda a fábrica e inclusive de maneira remota, via internet. O módulo que gerencia os dados dentro dos servidores é o *PI Server*.

Outros módulos da plataforma utilizados na empresa são:

- *PI Datalink* que disponibiliza os dados dos servidores ao *Microsoft Excel*;
- *PI Process Book*, ferramenta onde é possível desenvolver interfaces gráficas e dinâmicas com gráficos e informações do processo, esses podem ser compartilhados para toda a empresa;
- *PI CoreSight*, disponibiliza um acesso seguro e remoto aos dados. Por meio dessa ferramenta é possível verificar informações sobre a planta mesmo fora da instalação fabril em *tablets*, *smartphones* ou navegadores web.
- *PI Analytics FrameWork* (PI AF), permite a organização das informações em equipamentos. Nessa ferramenta, é possível desenvolver cálculos com as variáveis da planta, implementar eventos que são ativados sobre determinadas condições e, por meio desses eventos, enviar mensagens ao utilizador da ferramenta, sobre condições anormais nos equipamentos.

A governança do sistema é gerida pelo Departamento de Tecnologia da Informação da WestRock e a segurança dos dados é garantida pela *OSIsoft*. Já a integração entre o

software de controle, sensores e atuadores e o *PI System* é realizada pelo Departamento de Instrumentação em conjunto com o Departamento de Tecnologia da Informação.

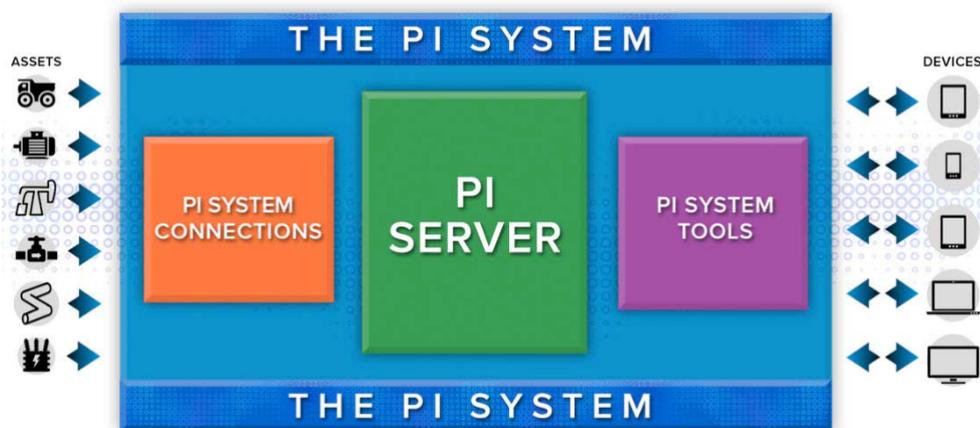


Figura 20 – Infraestrutura do PI System. Fonte: OSISoft

Toda informação armazenada nos servidores é vinculada a uma etiqueta, a uma data e a um horário de aquisição. A interconexão entre sistemas é obtida a partir do *PI System Connection*, que utiliza um protocolo XML. Nesse protocolo, é identificado o nome que a variável do processo tem no *Foxboro I/A*, sua unidade de medida, os seus limites, a descrição e o período de amostragem. Esses interfaceamentos podem ser verificados na [Figura 20](#), na qual estão ilustrados os diferentes dispositivos que podem ser conectados no PI System. O sistema, então, transmite as informações a dispositivos como: tablets, smartphones, notebooks e computadores.

## 3.5 Powerapps

O *Powerapps* é uma ferramenta criada pela *Microsoft* para desenvolvimento de aplicações corporativas. Esses aplicativos podem ser utilizados nos mais diversos dispositivos eletrônicos, sejam eles *tablets*, *smartphones* ou computadores. O *PowerApps* tem como principais atributos a facilidade de se conectar com outros sistemas, além do caráter visual e modular do desenvolvimento de aplicações.

Na WestRock, não há, ainda, aplicações desenvolvidas com o *Powerapps*. Porém, ele possui integração com o serviço de autenticação da empresa, o que permite a segurança das informações contidas nos aplicativos. Como toda aplicação web, o *Powerapps* possibilita que sua utilização se dê em qualquer computador, bastando apenas que esse tenha acesso à Internet. Entretanto, por essa característica, seu uso deve ser ponderado em ambientes fabris ou distantes de grandes centros, pois o acesso à Internet pode ser limitado nessas regiões.



## 4 Metodologia e solução proposta

Neste capítulo, abordaremos a metodologia e a solução proposta para cada um dos três eixos do projeto. Na Seção 4.1, será abordada a resolução do problema de comunicação entre a equipe de operação e supervisão. Já na Seção 4.2, discorrer-se-á sobre como será feita a integração entre os sistemas utilizados na fábrica e a solução para diminuir a subutilização do *software* supervisor. E, por fim, na Seção 4.3, será discutida a solução do problema de excesso de ocorrência de alarmes e qual será a metodologia utilizada para prevêê-los.

### 4.1 Relatos de Incidente

Para identificar quais etapas e agentes que podem ser retirados do processo de Relato de Incidente, foi confeccionado um fluxo de valor do estado atual. Para isso, monitorou-se quanto tempo era necessário para a realização de cada tarefa e o tempo entre cada uma das etapas. Esse fluxo de valor foi desenhado e pode ser visualizado na Figura 21. Por meio desse fluxo, é possível perceber que um relato pode demorar até cinco dias e meio para chegar à equipe de segurança e demanda, no total, 29 minutos de processamento.

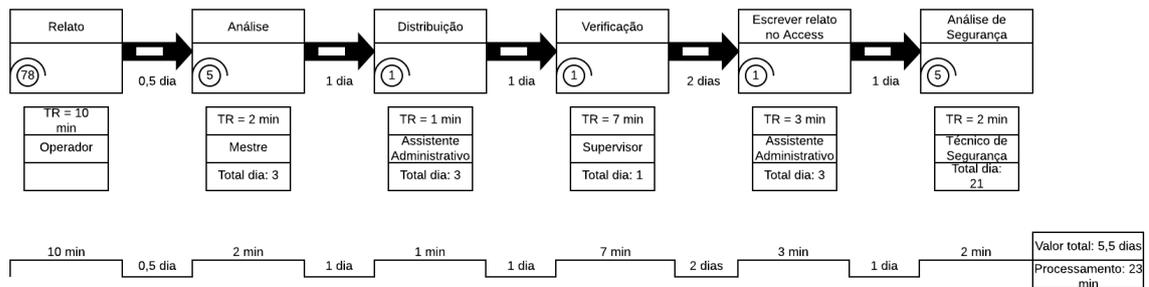


Figura 21 – Fluxo de Valor do processo de Relato de Incidente

Depois, foram verificados os *softwares* utilizados no processo. Foram encontradas duas ferramentas presentes: o *software* de gestão de ativos empresariais, do inglês (EAM), utilizado para abertura de ordens de serviço à equipe de manutenção, dentro da WestRock esse sistema é chamado de SAP, e o *Access*, banco de dados utilizado pela equipe de segurança para verificar os índices de incidente na fábrica. Em seguida, foi investigado se havia possibilidade de integração com esses dois sistemas. A versão do EAM utilizado pela fábrica não é atualizada e não possui os pacotes necessários para a integração com outros sistemas, sendo que sua atualização não está nos planos a curto prazo da empresa. Já o *Access* poderia ser substituído por um banco de dados proprietário e, assim, reduzir

o número de interfaceamentos entre sistemas. As etapas nas quais esses *softwares* estão presentes podem ser visualizadas na [Figura 22](#). Nessa figura, o Operador realiza o relato de incidente e repassa ao mestre do turno. O Mestre, então, espera o próximo dia para enviar a Assistente Administrativa do departamento. Essa distribui os relatos entre os Supervisores de cada área. Os supervisores analisam cada relato e criam uma ordem de serviço no EAM, na [Figura 22](#). O número da ordem é repassado à Assistente que repassa as informações do relato no sistema *Access* utilizado pela equipe de Segurança. Os tempos de realização, análise, distribuição e verificação do relato, além do tempo de transcrição no *Access*, análise do relato pela segurança e o tempo de movimentação da informação podem ser visualizados na [Figura 21](#).



Figura 22 – Fluxo de informação para o Relato de Incidente

Com auxílio da Supervisão, foram analisadas quais pessoas não necessitariam participar do processo, reduzindo, dessa maneira, o número de etapas no fluxo de valor. Além disso, analisou-se a possibilidade do uso de *software* para realização da distribuição da informação. Portanto, é proposto neste trabalho o fluxo ilustrado na [Figura 23](#). Nessa figura, é possível verificar uma redução de 99 % no tempo de disponibilização da informação à Supervisão. Nesse novo fluxo, assim que o Operador realiza o relato, ele é disponibilizado ao Supervisor da área. Além disso, a exclusão de três etapas e duas pessoas no processo, em relação ao fluxo da [Figura 21](#), e as informações estão armazenadas em meio digital, diminuí-se as chances de perda de informação.

Para projeto do *Software* de relatos, utilizou-se a *Unified Modeling Language* (UML), por ser uma linguagem padronizada para modelagem, especificação e construção de um sistema. Para visualização do sistema a ser desenvolvido foram escolhidos dois diagramas diferentes da UML, o Diagrama de Sequência e o Diagrama de Classes. o Diagrama de Sequência foi desenvolvido no *Lucidchart*, ferramenta web para o desenvolvimento de fluxogramas e diagramas. Já o Diagrama Conceitual foi desenvolvido utilizando o *BRModelo*, ferramenta construída em *Java* para desenvolvimento de banco de dados. Esse

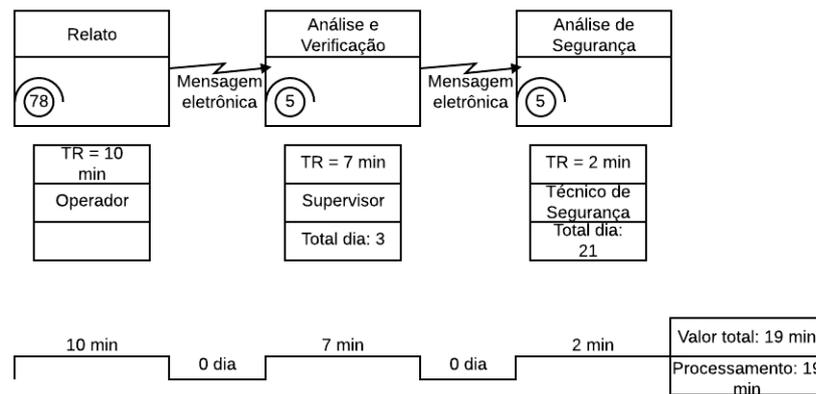


Figura 23 – Fluxo de valor futuro para o Relato de Incidente

Diagrama Conceitual é o passo inicial para criação das tabelas em um banco de dados.

No Diagrama de Sequência UML, verificou-se os principais agentes do processo e os casos de uso que o sistema deveria suportar. Adicionou-se a integração com o *Trello*, ferramenta utilizada pelo Departamento de Recuperação e Utilidades para acompanhar o andamento das manutenções nos equipamentos. Nessa ferramenta, utiliza-se um quadro compartilhado com a equipe de manutenção, onde cada um dos cartões representa um problema em algum equipamento e cada lista é um estado do serviço: "programado", "em avaliação", "esperando material" ou "concluída", semelhante ao método *Kanban* de administração de produção.

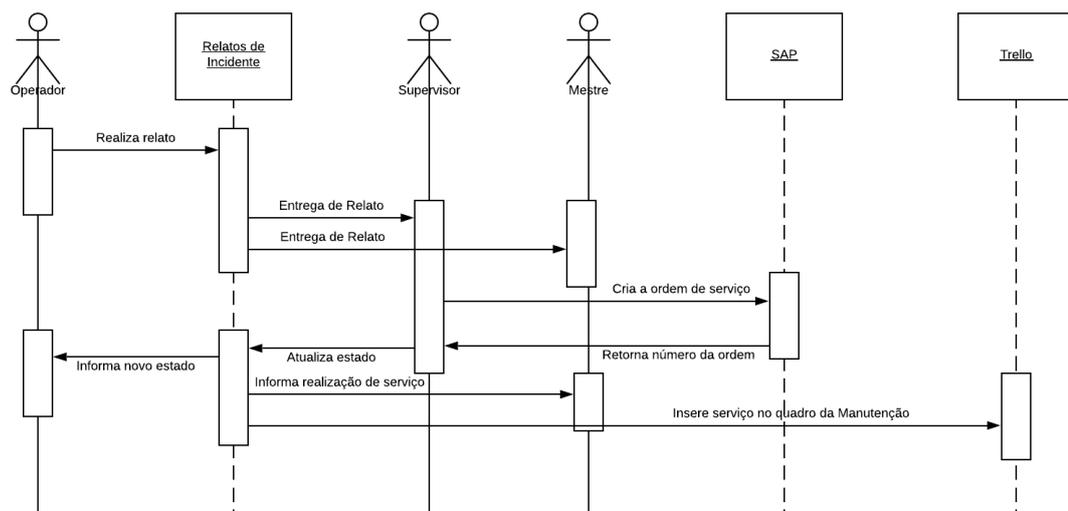


Figura 24 – Diagrama de sequência para o *software* de Relato de Incidente

O Diagrama de Sequência pode ser visualizado na [Figura 24](#). Nele, temos três agentes: (a) o operador, responsável pela confecção do relato de incidente; (b) o supervisor, responsável por analisar o relato e tomar uma ação para sanar o problema; e (c) o mestre,

que deve ser notificado sobre serviços em área para criar as Permissões de Trabalho. Como não é possível a integração com o sistema EAM, chamado no diagrama de SAP, o supervisor é responsável por abrir a ordem de serviço e alimentar o sistema de relato com o número da ordem. Por fim, o sistema informa ao operador que o relato foi verificado e cria um cartão no *Trello* sobre essa nova pendência.

As mensagens compartilhadas no diagrama da [Figura 24](#) iniciam-se com o envio das informações do incidente pelo operador para o sistema de relatos. O sistema, então, envia à Supervisão e ao Mestre uma notificação sobre a realização do relato. O supervisor cria no sistema EAM uma ordem de serviço para a Manutenção e escreve no sistema de relatos o número da ordem recebido, atualizando o estado do relato. O sistema envia ao Operador um *feedback* sobre seu relato e informa ao Mestre sobre a realização do serviço de manutenção. Além disso, o sistema encarrega-se de inserir o incidente relatado no *Trello*.

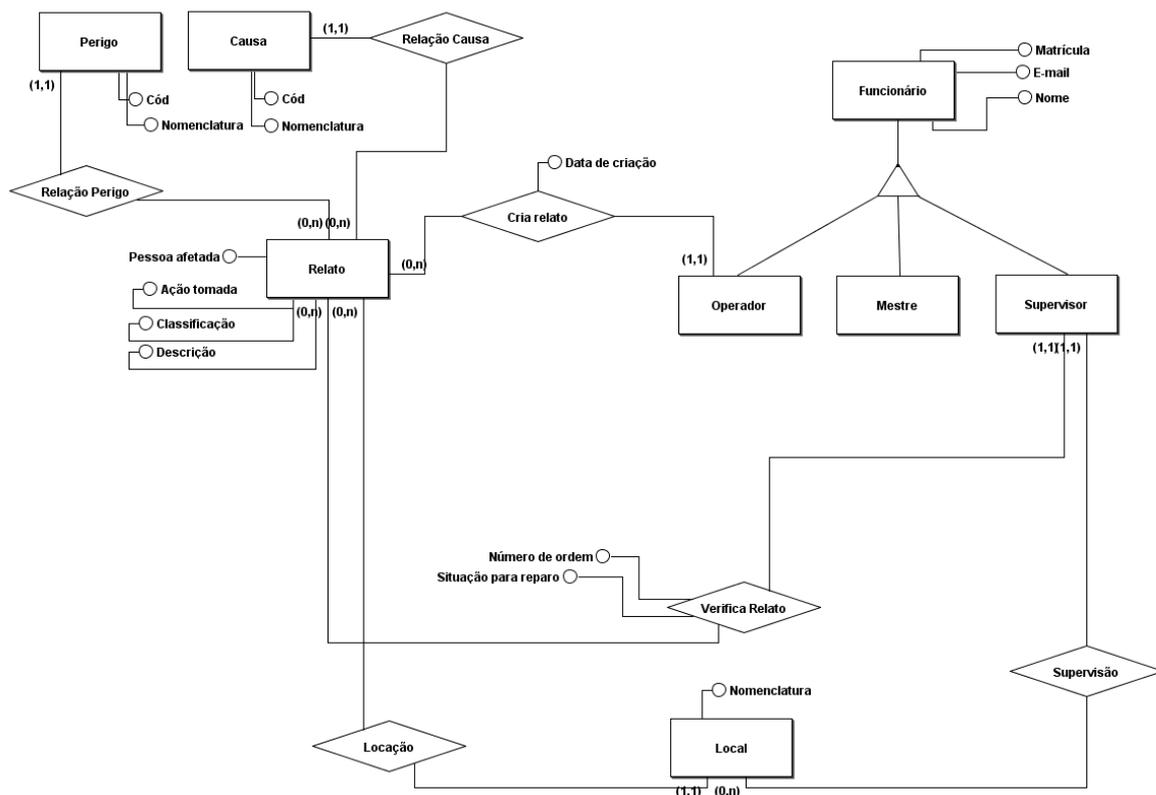


Figura 25 – Diagrama conceitual que inter-relaciona as informações necessárias para o relato de incidente

Finalmente, para facilitar a compreensão dos dados necessários para realização do relato de incidente e como eles se relacionam entre si, foi desenvolvido um diagrama conceitual, ilustrado na [Figura 25](#). A partir desse diagrama, depreendem-se as relações entre os agentes, podendo essa ferramenta ser utilizada para a futura implementação de um banco de dados. As relações encontradas no diagrama da [Figura 25](#) são:

- Relato e causas do incidente relatado (Relação Causa);
- Relato e perigos relacionados ao incidente (Relação Perigo);
- A criação de relatos pelo Operador (Cria relato);
- A locação de um relato de incidente em um local do departamento (Locação);
- A supervisão de um local do departamento por um engenheiro (Supervisão);
- A relação entre relato e responsável por verificar o relato (Verifica Relato);
- Funcionários podem ser de três subclasses distintas, operador, mestre e supervisor.

Além disso, o Diagrama Conceitual da [Figura 25](#) pontua quais atributos cada classe deve apresentar.

- Perigo: código e nomenclatura;
- Causa: código e nomenclatura;
- Funcionário: matrícula, e-mail e nome;
- Local: Nomenclatura;
- Relato: pessoa afetada, ação tomada, classificação e descrição.

E quais atributos as relações deveriam apresentar:

- Cria relato: data de criação;
- Verifica relato: número da ordem e situação do equipamento para reparo.

Os requisitos para esse sistema são:

- Disponibilização da informação dos relatos ao supervisor em tempo real;
- Confiabilidade no armazenamento da informação, não possibilitando que pessoas externas à WestRock tenham acesso aos relatos;
- Notificar Mestres sobre o estado da análise do incidente por e-mail, ou seja, notificá-lo quando é realizado um novo relato, quando há a abertura de uma ordem de serviço e se o equipamento pode ser consertado em operação normal ou apenas em paradas programadas;
- Permitir integração com o sistema de login da WestRock e com o *Trello*.

## 4.2 Sistema supervisorio

O sistema supervisorio contém apenas as principais informações sobre a Caldeira de Recuperação. Essas informações são utilizadas para visualizar se os principais índices de produção estão sendo cumpridos. Entretanto, problemas menores, como sensores descalibrados e atuadores defeituosos, se não modificarem os índices globais, não serão percebidos pela Supervisão. Também, caso haja um problema na caldeira, por meio do sistema supervisorio, não será possível encontrar a causa raiz com facilidade.

O outro problema enfrentado é a falta de alertas ativos à equipe de supervisão. Embora o sistema supervisorio utilizado pela *WestRock* apresente a possibilidade de envio de mensagens quando problemas são detectados, esse tipo de função ainda não é plenamente utilizada. Portanto, buscou-se não apenas a integração de novas informações ao sistema supervisorio como também o uso delas para a geração de mensagens de alerta, a fim de facilitar a identificação de problemas na planta.

Em conversa realizada com os operadores, perguntou-se sobre quais tipos de ação eram tomadas quando um problema era encontrado. Em geral, quando há uma variável com problemas, a malha que controla ela é passada para o modo manual e, assim, o operador passa a controlar ativamente tal sistema. A supervisão é notificada e, se o problema persistir, a equipe de instrumentação é chamada a caráter de emergência. A partir dessa maneira de operar a planta, é possível determinar os problemas relacionados à operação da caldeira pela quantidade de malhas de controle em manual. Outro ponto a ser analisado é o erro entre o *setpoint* definido e o valor da variável controlada. Por meio desse valor, é possível definir se há problema com os atuadores, sensores ou controlador e tomar medidas para corrigir o distúrbio.

A solução proposta, para resolução do problema apresentado por esse eixo do projeto, é integrar todas as informações das malhas de controle da Caldeira de Recuperação ao sistema supervisorio utilizado na *WestRock*, o *PI System*. Isto posto, deve-se criar uma tela com a visão geral dos controladores do equipamento e uma sub-tela com informações mais específicas sobre cada malha de controle. Conjuntamente, é preciso desenvolver notificações por e-mail para a Instrumentação e Supervisão sobre a mudança de estado da planta, de automático para manual, e quando o erro relacionado ao *setpoint* e variável controlada ultrapassar um valor pré-determinado.

Os passos a serem seguidos para atingir o objetivo especificado são os seguintes:

- Verificar quais são as malhas de controle da caldeira e quais informações referente a elas estão presentes no *Pi System*;
- Agregar as informações faltantes ao sistema e adicionar os cálculos necessários para criar os disparos de eventos;

- Desenvolver as telas do sistema supervisorio e os alertas à Supervisão.

Os controladores da Caldeira de Recuperação já estão devidamente catalogados em uma planilha, o que facilita a procura pelas informações pertencentes a eles no SDCD. Os requisitos para integração entre o SDCD e Sistema Supervisorio são os seguintes:

- Todas as malhas de controle da Caldeira de Recuperação devem estar disponíveis para verificação no Sistema Supervisorio;
- A tela do sistema deve ser facilmente compreensível, utilizando a nomenclatura usual para cada controlador;
- O e-mail deve ser enviado para a Supervisão e Manutenção assim que a malha começa a ser controlada manualmente pelo operador;
- As informações devem estar facilmente disponíveis a qualquer pessoa com computador na fábrica.

### 4.3 Gestão e predição dos alarmes

Para a resolução do problema de alta ocorrência de alarmes, foram coletados, no SDCD, todos os eventos referentes aos alarmes que se encontravam em seu historiador e rastreou-se os alarmes que mais ocorreram. Foram verificadas as disfunções referentes a cada um desses alarmes, principalmente no que tange os seus *setpoints* de disparo. Modificou-se, também, as suas prioridades, para que estejam de acordo com a EEMUA 191. Depois, foi verificado a eficácia dessas alterações, coletado novos dados do historiador de alarmes e foi averiguado novamente os alarmes que mais ocorreram. Esse foi um trabalho recursivo feito uma vez por semana para resultar em uma diminuição das ocorrências dos alarmes.

Ademais, para evocar um melhor nível de performance do sistema de alarmes e buscar um caminho para atingir o nível 5, alcançando a performance de um sistema preditivo, é proposta a aplicação de técnicas para predição de alarmes. Para isso, é necessário selecionar os alarmes que se deseja prever, verificar os momentos de suas ocorrências e aferir as condições da caldeira no momento no qual esses alarmes ocorreram. Um método que pode ser utilizado para esse objetivo consiste na criação de um grupo de treino composto por variáveis do sistema, rotuladas com as informações de estado "normal", "em pré-alarma" ou "em alarma", e utilizá-lo, posteriormente, para treinar uma rede de *Perceptron* Multicamadas. Por conseguinte, quando alimentarmos o modelo com novas informações, será possível prever as condições da caldeira.

Como requisitos para a predição dos alarmes definiu-se que como o algoritmo precisa classificar os dados em três diferentes classes, buscou-se uma taxa de acerto superior a

33,33 %, de maneira a ser maior que uma classificação aleatória. Também, desejou-se um algoritmo com tempo de treino reduzido, pois, como cada equipamento possui suas próprias particularidades, deseja-se criar um modelo de predição para cada alarme, sendo inviável sua geração, caso demande muito tempo de computação.

Como requisitos para a gestão dos alarmes estão:

- A redução do número de alarmes a valores próximos ao sugerido pela ISA 18.2;
- A aplicação de uma metodologia que pode ser aplicada continuamente por outras pessoas, tanto na Caldeira de Recuperação quanto em outros equipamentos;
- Possibilitar uma maior confiabilidade do sistema de alarmes com extinção dos principais *bad-actors*.

No [Capítulo 5](#), será possível verificar como essa predição foi implementada, quais variáveis da caldeira foram utilizadas e o porquê de se utilizar o *Perceptron* Multicamadas como técnica de classificação. No referido capítulo, serão analisados os resultados encontrados e como as soluções propostas foram eficazes em reduzir os problemas do sistema de segurança da Caldeira de Recuperação.

# 5 Desenvolvimento, implementação e análise dos resultados

Nesse capítulo, será abordado o desenvolvimento e a implementação dos três eixos do projeto: a automatização do processo de relatos de incidente, na Seção 5.1.1, a integração e automatização do sistema supervisorio, na Seção 5.1.2 e a gestão e predição dos alarmes, na Seção 5.1.3. Posteriormente, na Seção 5.2, será feita a análise dos resultados e como eles estão em concordância com os requisitos propostos.

## 5.1 Desenvolvimento e implementação

### 5.1.1 Automação dos Relatos de Incidentes

Para desenvolvimento do *software* de relato de incidente, houve a preocupação de utilizar uma ferramenta já disponível à *WestRock*. Para tanto, foi utilizada a ferramenta para criação de aplicativos corporativos da *Microsoft*, o *PowerApps*. Esse serviço é oferecido dentro do contrato da *WestRock* com a *Microsoft* e possui amplo suporte da comunidade. Outro ponto considerado é a futura gestão e manutenção do *software*: a utilização de uma ferramenta já conhecida por outros funcionários da empresa facilita a ocorrência de alterações no sistema para adequá-lo a novas realidades do departamento.

Como o *Powerapps* é uma ferramenta pensada para a integração de sistemas, a possibilidade de utilizar o sistema de e-mails, *login* e banco de dados é facilitada. Portanto, no início do desenvolvimento utilizou-se o diagrama de sequência apresentado na seção 4.1 para verificar o fluxo de informação que deveria ser criado e, principalmente, os sistemas que deveriam ser integrados. Também, utilizando esse diagrama e o modelo antigo de relatos, desenvolveu-se um escopo das telas que o aplicativo deveria ter (esse escopo foi ilustrado na Figura 26). Para fazer com que o operador reflita sobre o problema, criou-se perguntas sobre o incidente enfrentado. Assim, houve a tentativa de modificar a maneira pela qual a tarefa é realizada, de modo a deixá-la menos mecanizada.

As perguntas definidas foram as seguintes:

- Qual é o problema que está enfrentando?
- Há mais informações que gostaria de adicionar?
- Que perigos esse problema pode trazer?
- Onde esse problema ocorreu?

- Afetou alguém ou alguma empresa?
- Qual atitude foi tomada perante o problema?
- Como você classificaria essa ação?

Ao responder essas perguntas, o operador esclarece à Supervisão as principais informações sobre o incidente: local do incidente, nome da empreiteira observada (se houver), código da causa, código do perigo, descrição, ações e classificação. Como alguns operadores possuem problemas de visão e não possuem muita habilidade ao utilizar o computador, as perguntas foram distribuídas em diversas telas para facilitar a visualização, tanto do texto quanto dos controles.

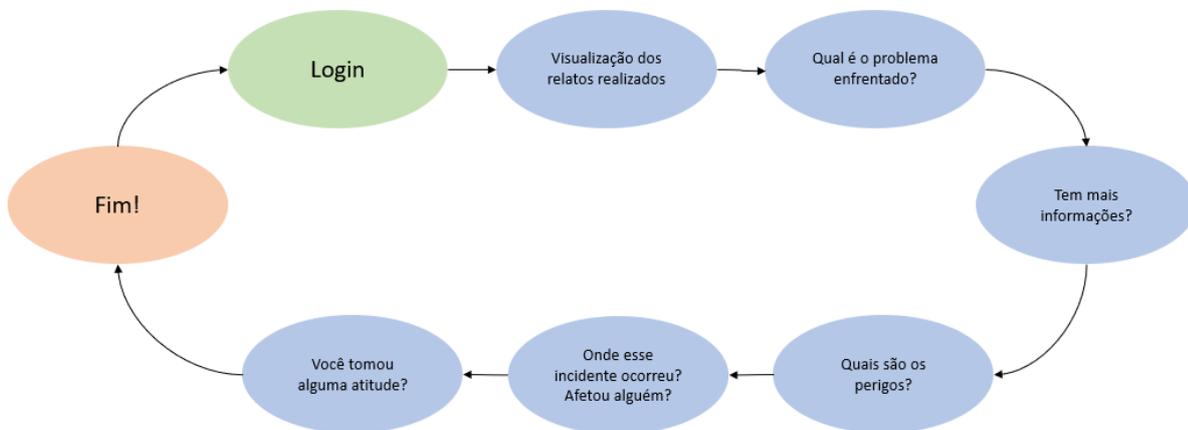


Figura 26 – Fluxo de Valor do processo de Relato de Incidente

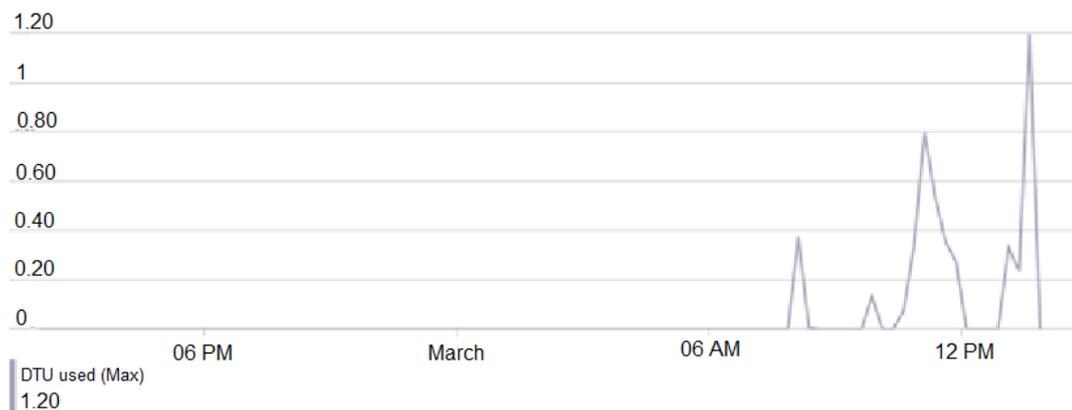
Outro artifício utilizado para facilitar a utilização do aplicativo de relato por parte do operador foi a separação das funções necessárias à Supervisão em outra aplicação. Assim, reduz-se o número de funções e comandos presentes no *software* e deixa-se de perturbar o operador em sua tarefa de relatar problemas na área. As funções necessárias a esse novo aplicativo são:

- Fazer *login* com o usuário desejado;
- Visualizar os relatos referentes a sua área;
- Modificar o supervisor de cada área;
- Adicionar novos funcionários, causas, perigos e áreas;
- Modificar o grupo que recebe notificações.

O banco de dados foi desenvolvido a partir do diagrama conceitual e resultou em seis tabelas: (a) Funcionários; (b) Causas; (c) Perigos; (d) Relação Supervisor e Área; (e)

Função; e (f) Relatos. No princípio, esse banco de dados foi desenvolvido no *Google Sheets* pela facilidade de integração e por não apresentar custos na implementação. Entretanto, a solução final apresentada é a utilização do *SQL Server* pela *Azure*. Esse serviço é um sistema *Plataform as a Service* (PaaS), ou seja, corresponde ao conjunto de *Hardware*, *Software* e hospedagem responsável por prover todo o acesso ao banco de dados. Com o *Azure*, não há a necessidade da realização de *login* em outro serviço web, além de poder aumentar a confiabilidade no registro das informações a longo prazo. A integração entre o *Powerapps* e *Azure* ocorre por requisições HTTPs.

Para definição dos atributos necessários de um banco de dados do projeto, foram realizados testes de performance. Nesses testes, um grupo formado por sete pessoas fez dezoito inserções no banco de dados. Os resultados podem ser visualizados na [Figura 27](#), em que DTU é o acrônimo de *Database Transaction Unit* e é um parâmetro definido pela *Microsoft* com a finalidade de verificar quantas transações um servidor de SQL pode processar por segundo.



(a) Utilização de DTUs



(b) Utilização de espaço de armazenamento

Figura 27 – Teste de performance do *SQL Server* na *Azure*

Os resultados acima mostram que, durante os testes, foram utilizados no máximo

1,20 DTUs e 4,6 MB de espaço em disco. Extrapolando-se esses resultados, é possível definir que, para o *software* desenvolvido, é necessário um servidor com 5 DTUs e 5 GB para armazenar 20.000 relatos.

O desenvolvimento da interface gráfica foi facilitada pelo *PowerApps*, pois, para criação de botões, listas, formulários e comandos, é necessário apenas selecioná-los e arrastá-los até a posição desejada. Para a implementação das funções e operações necessárias, o *Software* apresenta uma linguagem de programação proprietária, semelhante à linguagem C# utilizada para aplicações *Windows*. Para acesso a qualquer aplicativo desenvolvido no *Powerapps* é necessário fazer login em uma conta *Microsoft*. Essa conta deve ser previamente autorizada para acesso aos dados da aplicação. Como todo funcionário da WestRock utiliza o serviço de *login* corporativo da *Microsoft* facilitou-se a implementação de um *software* seguro e restrito aos funcionários do DRU.

Após o *login*, o operador deve inserir a sua matrícula na tela inicial, ilustrada na [Figura 28](#). Ao confirmar, uma requisição é feita ao banco de dados para verificar a existência do funcionário.



Figura 28 – Tela de *login* do aplicativo de relato de incidente

Se o funcionário existir, o sistema do banco de dados retorna os relatos realizados pelo operador selecionado. O sistema de relatos, então, elenca os relatos criados nos últimos trinta dias e fornece-os em uma lista, como ilustrado na [Figura 29](#). Os relatos podem ter dois estados diferentes "Em análise" e "Verificado". Esses estados mudam de acordo com o selecionado pelo Supervisor da área e possuem a função de levar ao Operador um *feedback* do Supervisor.

Caso deseje criar um novo relato, o Operador pode pressionar o botão Novo

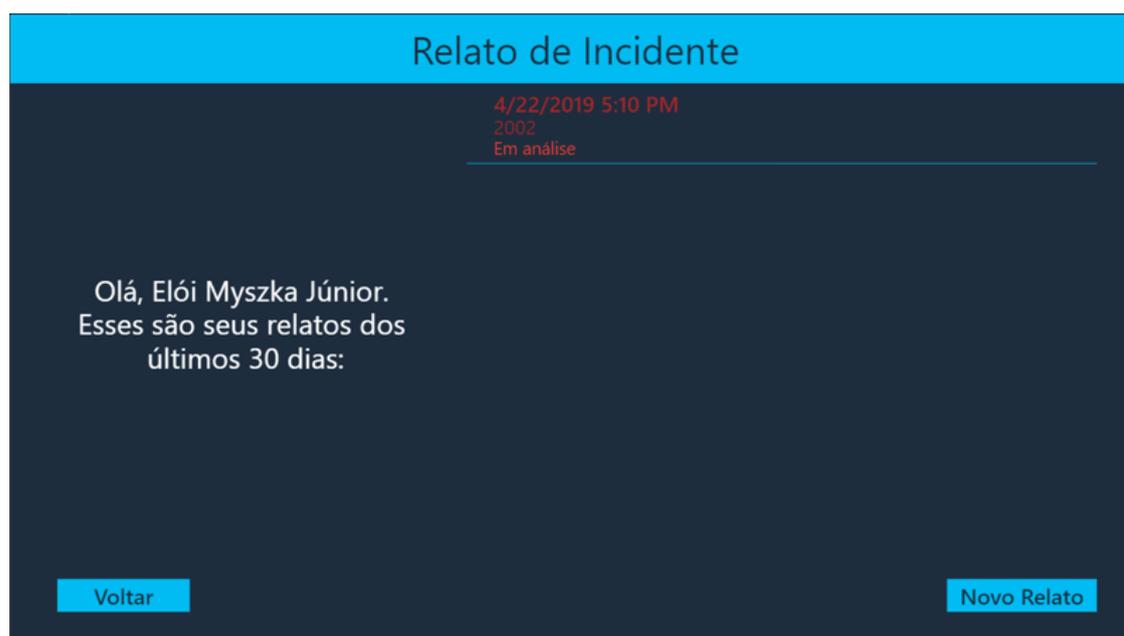


Figura 29 – Exibição dos relatos realizados pelo Operador selecionado nos últimos 30 dias

Relato na tela da [Figura 29](#). A partir desse momento, ele deverá responder as perguntas destacadas na [Figura 26](#). Essas perguntas foram separadas em diversas telas, ilustradas na [Figura 30](#), assim é possível aumentar o tamanho das letras e botões e possibilitar uma fácil utilização pelo operador. A [Figura 30\(a\)](#) refere-se a causa do problema, a [Figura 30\(b\)](#) ao equipamento afetado e mais informações que podem ser adicionadas para facilitar ao supervisor a compreensão do incidente e a [Figura 30\(c\)](#) o tipo de perigo que o incidente pode trazer aos equipamentos e aos funcionários. Todas as causas e perigos presentes no DRU podem ser visualizados no [Apêndice A](#).

A [Figura 31](#) ilustra as próximas telas do sistema. Na [Figura 31\(a\)](#), o operador deve selecionar a área na qual o incidente ocorreu. É a partir dessa informação que se define qual supervisor será responsável por analisar o incidente e tomar uma ação de maneira a corrigir o problema relatado.

Ao finalizar o relato, na tela ilustrada na [Figura 31\(b\)](#), os mestres e o supervisor de área são notificados por e-mail. Como o sistema de e-mails utilizados pela *WestRock* é o *Outlook*, também um serviço oferecido pela *Microsoft*, a possibilidade de envio de mensagens, por meio do *Powerapps*, já é nativa, o que facilitou sua implementação. Além de ser notificado, o supervisor recebe, em seu aplicativo, um novo relato que deve ser verificado, como ilustrado na [Figura 32](#).

Nessa tela, encontram-se todos os relatos que o supervisor ainda não verificou. Ao clicar sobre o relato desejado, o supervisor é levado até a tela de verificação. Nessa tela, ilustrada na [Figura 33](#), o supervisor pode aferir a causa do relato e analisar qual ação poderá tomar para solucionar o problema relatado. Se a solução envolver o Departamento

Relato de Incidente

Olá, Elói Myszka Júnior. Qual é seu problema?

- Operação de Equipamento sem autorização
- Não sinalização ou advertência
- Falha ao bloquear ou resguardar
- Operação em velocidade inadequada
- Tornaram os dispositivos de segurança ou equipamentos de controle inoperáveis.

Você pode buscar seu problema pelo código da causa, também.

Código da Causa

Voltar Confirmar

(a)

Relato de Incidente

TAG do equipamento afetado: TAG do Equipamento

Há mais informações que você gostaria de adicionar?

Voltar Confirmar

(b)

Relato de Incidente

Que perigos esse problema pode trazer?

- Exposição de partículas e/ou poeiras.
- Projeção de respingos de produtos químicos.
- Manuseio e /ou contato com produtos químicos corrosivos e/ou tóxicos e/ou cáusticos.
- Exposição a gases tóxicos (H2S, CO, NOX, SO2).
- Exposição e/ou contato com agentes inflamáveis/combustível (diesel, combustível, tinta, lubrificante, terebentina, verniz, ...)

Você pode buscar o perigo pelo código do perigo, também.

Código do Perigo

Voltar Confirmar

(c)

Figura 30 – Telas do sistema de desenvolvimento de relatos pela equipe de operação

Relato de Incidente

Onde esse problema ocorreu? Caldeira de Recuperação 3

Afetou alguém ou alguma empresa?

Sim  
 Não

Nome da pessoa ou empreiteira

Voltar Confirmar

(a)

Relato de Incidente

Qual atitude foi tomada perante o problema?

Descreva a ação realizada

Você classifica essa ação como:

Melhoria  
 Manutenção

Voltar Finalizar

(b)

Figura 31 – Telas do sistema de desenvolvimento de relatos pela equipe de operação

de Manutenção, é necessário abrir uma ordem de serviço no sistema EAM utilizado na fábrica. Com o número da ordem em mãos, é possível inseri-lo no campo "Nota", de maneira a deixá-lo registrado para futuras análises. É possível, também, atrelar um equipamento ao problema, por meio de seu código de registro. O supervisor deve inserir em qual condição pode haver o reparo, em condição normal ou em parada. Por fim, ele pode mudar o estado do relato para "Verificado". Ao confirmar as modificações, um e-mail é enviado aos mestres apontando as decisões que foram tomadas, o número da ordem de serviço e a condição de reparo. Ademais, se um número de nota for inserido, o relato passa a fazer parte do quadro da Manutenção no *Trello*. A integração com *Trello* ocorre por meio da API proprietária. Essa API atua mediante requisições HTTPs.

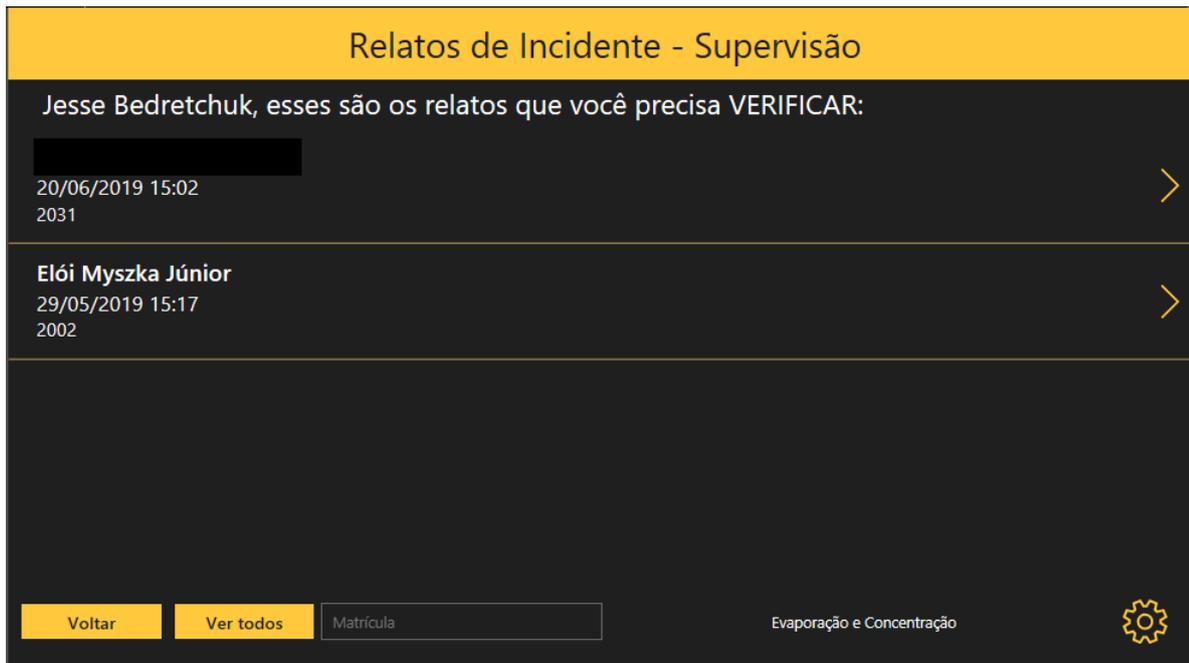


Figura 32 – Tela inicial do Supervisor



Figura 33 – Tela de verificação do relato

### 5.1.2 Integração e automação do Sistema Supervisório

A equipe de instrumentação possui um arquivo descrevendo os Controladores de Processo (CP) existentes e as malhas de controle que pertencem a cada um deles. A caldeira possui dois desses controladores, o CP6701 e CP7701, que operam em paralelo para redundância do sistema. Portanto, para verificar os controladores referentes à caldeira, basta filtrar os controlares concernentes a um desses CPs.

Tabela 1 – Informações dos controladores da Caldeira de Recuperação

CP	Compound	Block	Type	Description	UOM	MEAS
CP6701	67GL	LIC67021A	PIDA	NIVEL DO TANQUE DE DISSOLUCAO	%	67GL:LT67021.PNT
CP6701	67DL	LIC67022	PIDA	NIVEL TQ. EXPANSAO 2KG	%	67DL:LT67022.PNT
CP6701	67SH	TIC67029	PIDA	TEMP.VAPOR ENTRANDSUPERAQUEC.#2	DEGC	67SH:TT67029.PNT
CP6701	67FO	PIC67045	PIDA	PRESSAO OLEO COMB QUEIM.PARTIDA	KG/CM2	67FO:PT67045.PNT
CP6701	67DL	LIC67016B	PIDA	NIVEL TQ COND. 1 (COND.CR3)	%	69BOP:LT67901.PNT

A [Tabela 1](#) apresenta apenas a *tag* da variável controlada, chamada de *MEAS*. Conseqüentemente, é necessário buscar, no SDCD, as outras variáveis da malha de controle: modo do controlador (manual ou automático), sinal de saída do controlador e *Setpoint*. No SDCD, observando-se as conexões realizadas e o nome definido para o *MEAS*, é possível identificar as *tags* que representam as outras variáveis da malha e construir o [Algoritmo 5.1](#) de integração entre o *PI System* e *Foxboro I/A Series*.

Com esse código instalado nos CPs da caldeira, o sistema supervisorio, a partir da nomenclatura utilizada por ele - por exemplo B103-RB3-QC67009-OP -, consegue acessar a variável do SDCD, W7701/67FG:QC67009.OUT. Nesse arquivo, encontram-se, também, as informações referentes ao tempo de atualização do valor da variável e se o modo de operação é de leitura ou escrita.

Algoritmo 5.1 – Código XML para integração entre *Pi System* e *Foxboro I/A Series*

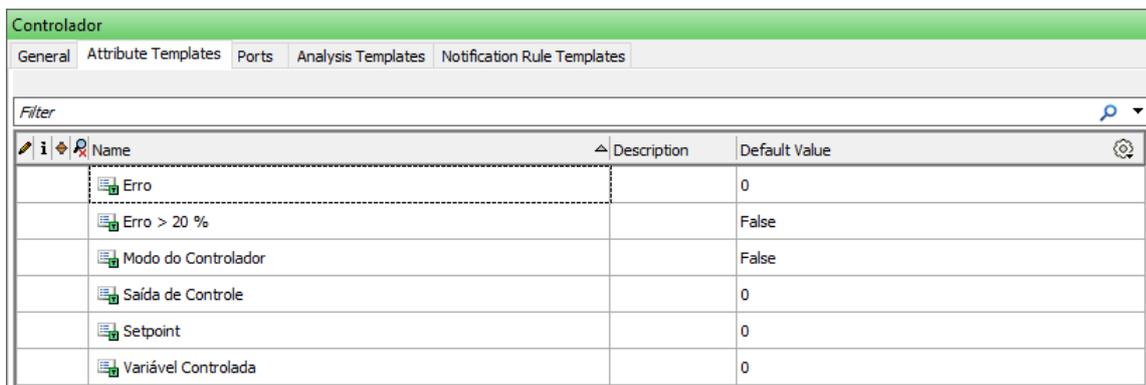
```
<PSTAlias name="B103-RB3-QC67009-OP" itemPath="AW7701/67FG:QC67009.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-DY67341C-OP" itemPath="AW7701/67BL:DY67341C.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-TIC67032-OP" itemPath="AW7701/67SH:TIC67032.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-QIC67009-OP" itemPath="AW7701/67FG:QIC67009.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-PC67026-OP" itemPath="AW7701/67FD:PC67026.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-PIC67042-OP" itemPath="AW7701/67FD:67BL:PIC67042.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-PC67046-OP" itemPath="AW7701/67LB:PC67046.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
<PSTAlias name="B103-RB3-PIC67043-OP" itemPath="AW7701/67SCR:PIC67043.OUT" dataType=""
  readOnly="1" updateRate="2000" pollAlways="0"/>
```

Do lado do *PI System*, é necessário configurar o nome da variável (B103-RB3-TIC67032-OP), a sua descrição, o intervalo de operação e a resolução da leitura. Na *WestRock*, a nomenclatura da variável segue o seguinte padrão:

- Identificação do negócio (B103 - Fábrica de Papel de Três Barras);
- O mnemônico da área (RB3 - Recovery Boiler 3);

- Tipo da variável medida (T - temperatura);
- Identificação e função do componente na malha (IC - Indicador e Controle);
- Código da área (67 - RB3);
- Número identificador do instrumento na rede (67032);
- Letra de diferenciação do instrumento (se houver);
- O sufixo representando o parâmetro da variável (OP - Saída de controle).

Com a comunicação entre os dois sistemas operando, é necessário organizar as variáveis no *PI AF*. Nesse sistema, é possível atribuir cada uma dessas variáveis a um modelo de equipamento. Para isso, criou-se um modelo de controlador genérico que necessita das informações de modo de controle, sinal de saída do controlador, variável controlada e *setpoint*. No *PI AF*, é possível realizar cálculos com os dados desejados. As variáveis configuradas e os cálculos realizados, podem ser visualizados na figura [Figura 34](#). Foi calculado o erro entre o *setpoint* e a variável controlada, bem como foi verificado se o resultado desse cálculo é maior que 20 % em relação ao *setpoint*, cujo valor foi definido pelos engenheiros da Instrumentação, que encontraram nesse valor um razoável parâmetro para análise. Além disso, foi averiguado se a malha está operando no modo manual ou automático.



Name	Description	Default Value
Erro		0
Erro > 20 %		False
Modo do Controlador		False
Saída de Controle		0
Setpoint		0
Variável Controlada		0

Figura 34 – Modelo do controlador no *PI AF*

Esse modelo foi atribuído a todos os controladores da caldeira e resultou na estrutura presente na [Figura 35](#). Foram desenvolvidos eventos que são disparados quando o erro é maior que 20 % ou quando a malha de controle muda de modo operante para manual. Esses eventos são utilizados, posteriormente, para gerar e-mails ao supervisor da área. Para que oscilações na variável controlada não causem um envio excessivo de mensagens, foi definido um *delay-on* para que o e-mail seja disparado. Dessa maneira, um aviso só é enviado se o erro permanecer por mais de dez minutos além do determinado.

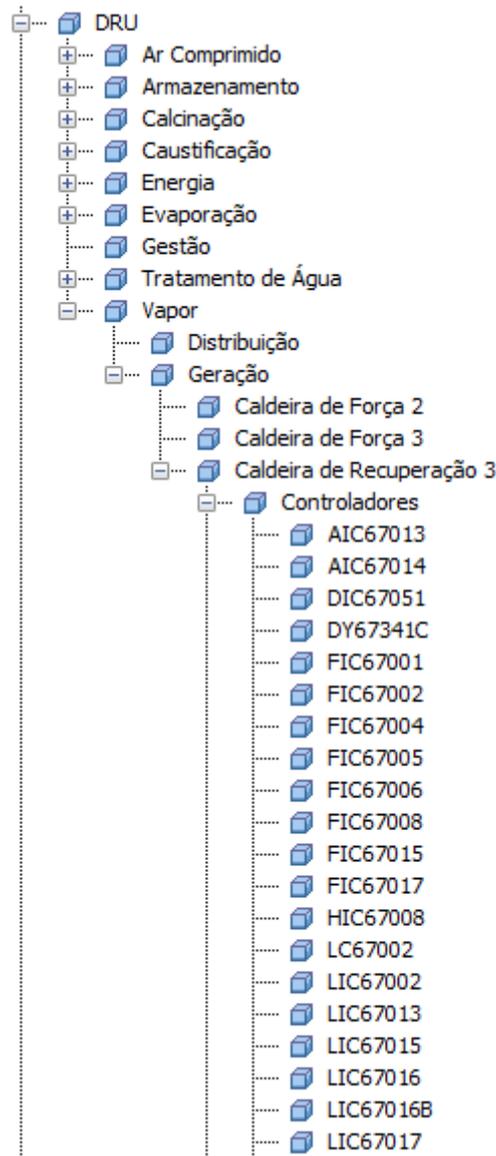


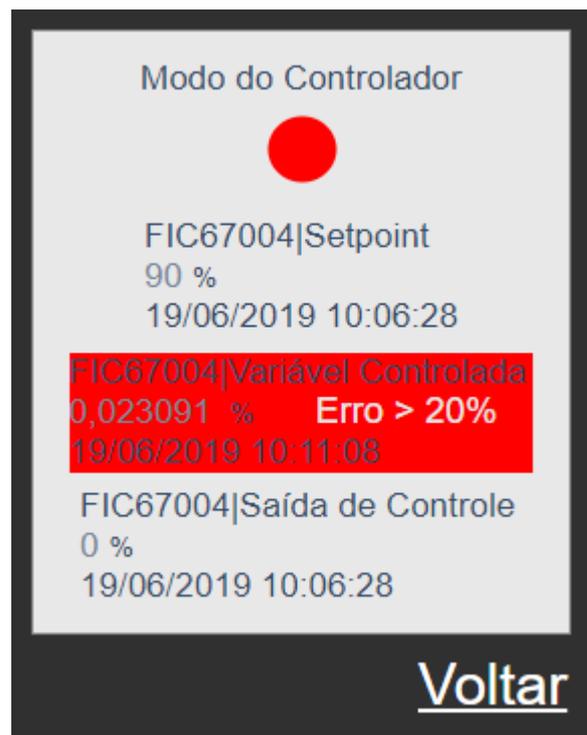
Figura 35 – Modelo do controlador no *PI AF*

Com todas as informações configuradas, foi possível desenvolver as telas do sistema supervisório. Utilizando o *PI Coresight*, foi desenvolvida uma tela possuindo todos os controladores da caldeira. Nela, foi inserido o estado atual de cada malha de controle, assim como a porcentagem de malhas em automático, separando-as por tipo de variável controlada. Ao selecionar o controlador desejado, é possível verificar as principais informações relacionadas a ele e os avisos que mostram se o erro na malha de controle é superior a 20 % ou se o modo de controle é manual. A tela de modo de operação e de informações específicas sobre cada controlador pode ser visualizada na [Figura 36](#).

Para facilitar a visualização da tela ilustrada na [Figura 36](#), foi separado três partes principais, a legenda, os controladores de nível e os mostradores de porcentagem de malhas de controle em automático. Na legenda, mostrada na [Figura 37\(a\)](#), há três possíveis cores para o círculo que representa a malha de controle. A cor branca significa que



(a) Interface do Sistema Supervisório dos controladores da Caldeira de Recuperação

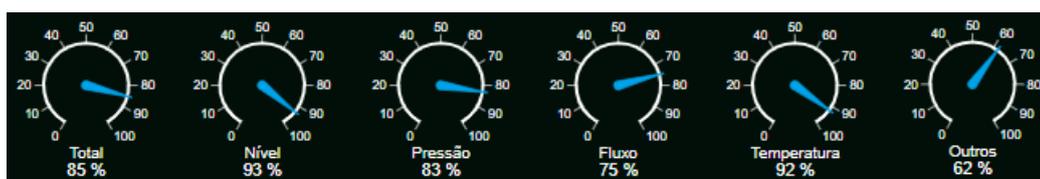


(b) Interface específica para cada controlador da Caldeira

Figura 36 – Interface do Sistema Supervisório dos controladores da Caldeira de Recuperação

existe um erro de comunicação entre o SDCD e o *PI System*, vermelho indica que a malha de controle está sendo operada manualmente pelo operador e, por fim, verde significa que a malha está em automático. Na Figura 37(b), foram selecionados os controladores de nível para representar como ocorre a identificação de cada malha de controle. Cada

malha é identificada com uma etiqueta (*TAG*), a mesma utilizada no SDCD, juntamente com a descrição do equipamento ou variável controlada. No canto superior direito há a quantidade de malhas em automático e o total de controladores de nível na Caldeira de Recuperação. No topo da tela do sistema supervisorio, há relógios que mostram a porcentagem de malhas de controle em automático na caldeira. A Figura 37(c) ilustra esses relógios. Nela, podemos identificar que os controladores foram divididos em diferentes tipos de variáveis controladas, nível, pressão, fluxo e temperatura.



(c) Porcentagem de malhas de controle em automático

Figura 37 – Detalhes do sistema supervisorio dos controladores

Os e-mails disparados pelo sistema, que estão ilustrados na Figura 38, possuem uma série de informações com o intuito de facilitar ao Supervisor o entendimento sobre o problema enfrentado:

- Horário de início do evento;
- Modo do controlador;
- *Setpoint*;

- Variável controlada;
- Saída de controle;
- Severidade da situação;
- Horário de envio da mensagem.

Na [Figura 38](#), estão ilustrados os dois possíveis e-mails que o supervisor pode receber por esse sistema, o aviso de erro maior que 20 % e o modo de operação da malha de controle.



(a) E-mail enviado quando o modo da malha de controle foi alterado para manual



(b) E-mail enviado quando o erro entre o *setpoint* e variável controlada é maior que 20 %

Figura 38 – E-mails de aviso sobre problemas e modificações nas malhas de controle da Caldeira de Recuperação

### 5.1.3 Gestão dos alarmes

O primeiro passo para a gestão dos alarmes foi obter as ocorrências disponíveis no historiador do CP da Caldeira de Recuperação. Com esses dados, foi utilizado um algoritmo desenvolvido em *Python* para verificar a situação do sistema de alarmes. Realizando a contagem de ocorrência por dia, foi possível desenvolver um gráfico com o histórico de

alarmes. Esse gráfico foi importante para verificar se o número de alarmes estava relacionado com algum distúrbio ocorrido na caldeira. Entretanto, por meio do gráfico representado na [Figura 39](#), verificou-se que um grande número de alarmes ocorre diariamente na caldeira, independentemente do dia.

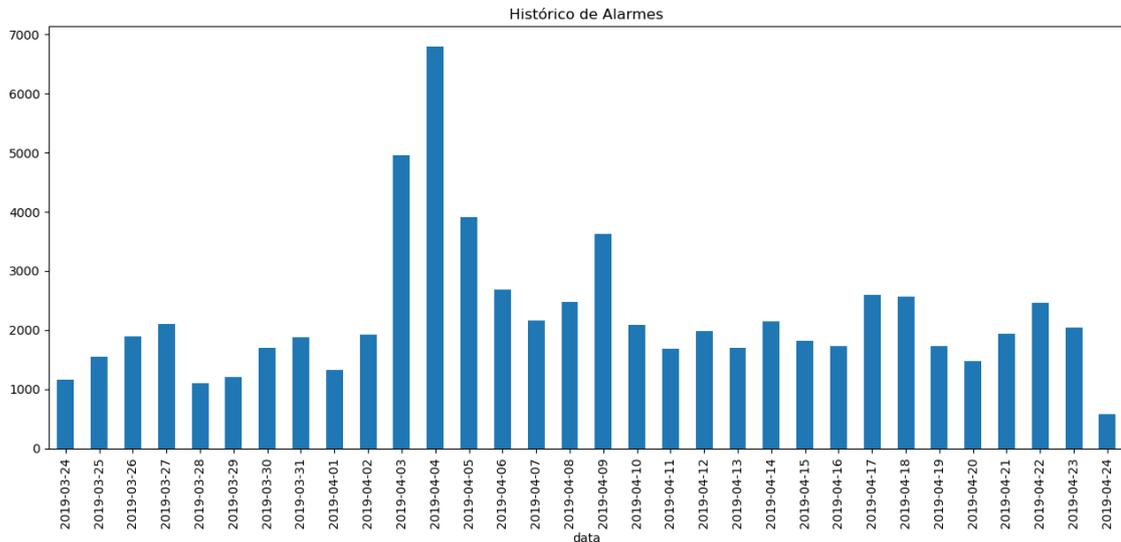


Figura 39 – Histórico de ocorrência de alarmes na Caldeira de Recuperação nos meses de março e abril

Nota-se pelo gráfico na [Figura 39](#), que houve um grande número de alarmes nos dias 3, 4 e 5 de abril. Essa quantidade decorre de uma parada na caldeira, a qual foi ocasionada por problemas no equipamento. Tal condição está fora da operação normal do equipamento, podendo ser o fator que aumentou a incidência de alarmes.

Os *bad actors* são os alarmes mais frequentes em uma planta fabril. A norma EEMUA 191 [14] sugere que eles são responsáveis por até 80 % das ocorrências de alarmes. Portanto, para início da análise, são elencados os vinte alarmes que mais ocorrem, cujos dados são apresentados em ordem decrescente e acrescidos do acumulado percentual (quantidade de ocorrências do alarme em questão somado com os anteriores em relação as ocorrências totais). Para facilitar a visualização, é gerado, por meio do algoritmo, um gráfico de Pareto com as informações, conforme demonstrado na [Figura 40](#).

A partir dessa análise, é possível concluir que os vinte alarmes mais frequentes são responsáveis por 73,58 % das ocorrências. É necessário, portanto, que se efetuem novas análises, a fim de verificar o porquê de tais alarmes tornarem-se *bad-actors* no período estudado.

O algoritmo, então, seleciona todos os *bad-actors* apresentados e cria um arquivo csv com as informações referentes ao tipo de alarme "LLABS", "LOABS", "HIABS" ou "HHABS" que ocorreu, o *setpoint* de disparo e o número de ocorrências. Com auxílio dessas informações, é possível verificar se há alarmes duplicados referentes ao mesmo problema e

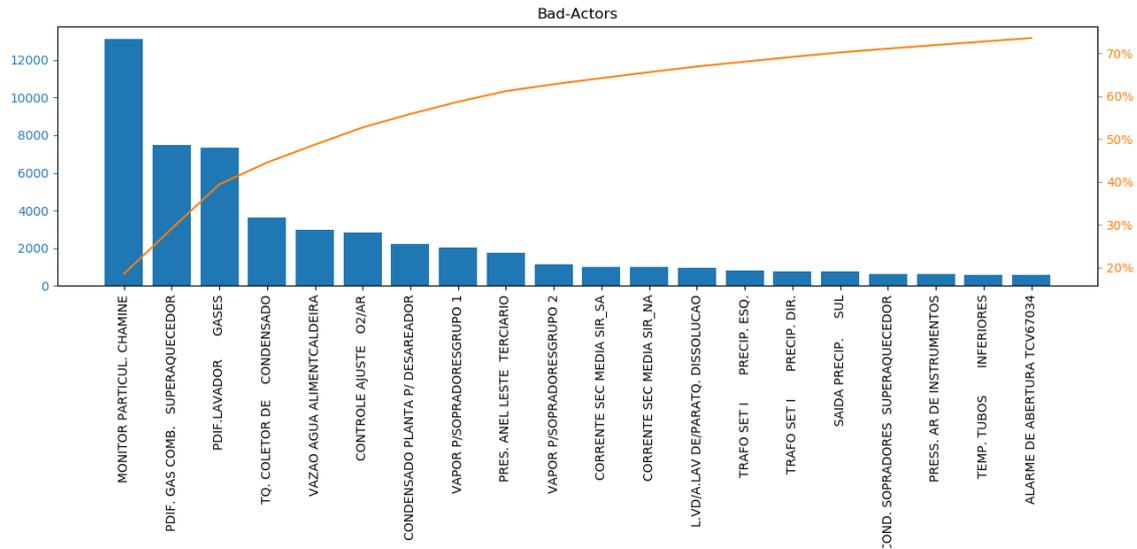


Figura 40 – Pareto com os vinte alarmes que mais ocorreram na Caldeira de Recuperação

se os *setpoints* de disparo estão condizentes com a fronteira entre a operação normal e uma situação de distúrbio.

Tabela 2 – Os vinte alarmes que mais ocorreram no mês de março e abril

alarme	tipoa	valoralarme	ocorrencias
ALARME DE ABERTURA TCV67034	HIABS	60	580
COND. SOPRADORES SUPER- AQUECEDOR	HHABS	245	10
	HIABS	245	10
	HIABS	300	583
	LOABS	250	14
CONDENSADO PLANTA P/ DESAREADOR	HIABS	90000	1258
	LLABS	5000	972
CONTROLE AJUSTE O2/AR	HIABS	3.5	10
	LLABS	0.5	1422
CORRENTE SEC MEDIA SIR_NA	LOABS	10	990
	LOABS	10	1012
L.VD/A.LAV DE/PARA TQ. DISSOLUCAO	LOABS	400	940
	DISABL	0	7
MONITOR PARTICUL. CHAMINE	HHABS	150	1174
	HHABS	180	5388
	HIABS	150	1174
	HIABS	180	5388

Tabela 2 (Continuação) - Os vinte alarmes que mais ocorreram

alarme	tipoa	valoralarme	ocorrencias
PDIF. GAS COMB. SUPER- AQUECEDOR	DISABL	0	1
	HIABS	30	6594
	IOBAD	0	898
PDIF.LAVADOR GASES	HIABS	360	62
	LOABS	0	7294
PRES. ANEL LESTE TERCIARIO	HIABS	450	682
	LOABS	220	1089
PRESS. AR DE INSTRU- MENTOS	LLABS	5.1	302
	LOABS	5.1	302
SAIDA PRECIP. SUL	LOABS	-260	746
	HIABS	300	4
	LLABS	90	569
	LOABS	0	8
TQ. COLETOR DE CON- DENSADO	HIABS	80	2
	LOABS	30	3616
TRAFO SET I PRECIP. DIR.	LOABS	5	788
	LOABS	5	802
VAPOR P/SOPRADORES GRUPO 1	HIABS	11000	2018
VAPOR P/SOPRADORES GRUPO 2	HIABS	11000	1136
VAZAO AGUA ALIMENT CALDEIRA	HIABS	172000	1646
	LLABS	50000	862
	LOABS	30000	454

Analisando a tabela disponibilizada, chega-se às seguintes conclusões:

- Os alarmes “muito alto” e “alto” para o “COND. SOPRADORES SUPERAQUECEDOR” apresentam o mesmo valor (245). Assim os dois alarmes são acionados simultaneamente;
- Os alarmes “muito baixo” e “baixo” para o “CONTROLE AJUSTE O<sub>2</sub>/AR” apresentam, também, o mesmo valor (0,5), sendo, também, acionados simultaneamente;
- O “MONITOR PARTICUL. CHAMINE” apresenta duplicação nos seus alarmes “muito alto” e “alto”, sendo que ambos apresentam os mesmos valores;
- A “PRES. AR DE INSTRUMENTOS” tem seus alarmes “baixo” e “muito baixo” apresentando os mesmos valores.

Outras análises realizadas pelo algoritmo são: a distribuição de prioridades, o tempo de vida de um alarme e o tempo que o operador leva para reconhecer um alarme. A distribuição de prioridades dos alarmes coletados em abril pode ser observada na [Figura 41](#). Para que seja feita a análise de tempo de vida do alarme, necessita-se que sejam feitas algumas suposições. Isso se dá pela ausência de informação de que o problema que resultou em alarme foi resolvido. Portanto, cria-se uma janela de tempo, com período pré-determinado e desliza-a sobre o histórico de ocorrência de alarmes. Se o alarme selecionado aparece nessa janela de tempo, então, dá-se início ao tempo de vida do alarme. A janela continua percorrendo o histórico e, se o alarme não voltar a ocorrer, dizemos que ele completou sua vida e um arquivo csv é confeccionado com o tempo de cada ocorrência. O tempo de vida das ocorrências do alarme de vazão de ar primário podem ser verificadas na [Tabela 3](#).

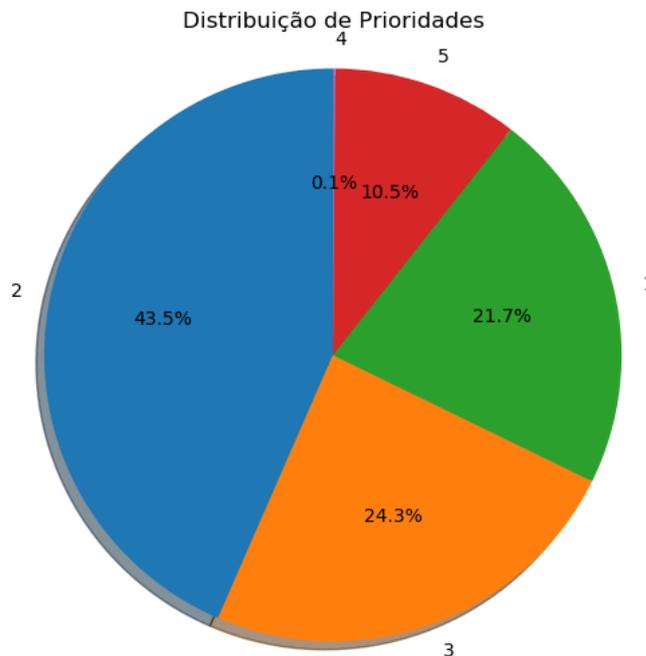


Figura 41 – Distribuição das prioridades dos alarmes da caldeira de recuperação.

Tabela 3 – Tempo de vida das ocorrências do alarme de Ar Primário

	Início	Final
1	03/04/2019 09:38	03/04/2019 09:38
2	03/04/2019 11:59	03/04/2019 12:00
3	03/04/2019 19:00	03/04/2019 19:00
4	04/04/2019 00:59	04/04/2019 00:59
5	04/04/2019 09:54	04/04/2019 10:01
6	04/04/2019 10:15	04/04/2019 10:24
7	04/04/2019 13:32	04/04/2019 13:32
8	04/04/2019 15:05	04/04/2019 15:05

Para análise de tempo de reconhecimento, é inserido na memória o tempo no qual o alarme surgiu. Depois, é salvo o tempo no qual ocorreu a mensagem de reconhecimento. A diferença entre esses dois tempos, é chamado de tempo de reconhecimento. É possível inserir no algoritmo o alarme analisado e o período de tempo que se deseja estudar. A seleção do período é necessário para estudar o comportamento de operação de um determinado turno ou operador.

Outro problema identificado é a nomenclatura dos alarmes. Segundo a norma EEMUA 191, um alarme deve informar e conduzir o operador sobre o problema enfrentado, sendo imprescindível a indicação de uma possível ação que deve ser tomada para resolvê-lo. Para contornar os problemas apresentados, desenvolveu-se algumas modificações nos alarmes mais recorrentes, conforme mostrado em sequência.

- Nome anterior: **MONITOR PARTICUL. CHAMINE**

Novo nome: PARTICULADOS DA CHAMINE;

Alteração realizada: Modificação dos *Setpoints*, utilizando como referência a Resolução 436 do CONAMA [33]. Mantido em um minuto o tempo que a variável deve estar acima do *setpoint* para que o alarme seja ativado, ou seja, um *delay-on* no disparo do alarme. Dessa maneira, breves oscilações na quantidade de particulado que sai da chaminé não provoca acionamentos desnecessários do alarme.;

Novo *setpoint* para alarme "Muito Alto": 240;

Novo *setpoint* para alarme "Alto": 200.

- Nome anterior: **PDIF. LAVADOR GASES**

Novo nome: DIFERENCIAL DE PRESSAO DO LAVADOR DE GASES;

Alteração realizada: Retirado o alarme de diferencial baixo, pois não existe limite mínimo que possa contribuir em um mal funcionamento da caldeira.

- Nome anterior: **VAZAO AGUA ALIMENTCALDEIRA**

Novo Nome: VAZAO AGUA DE ALIMENTACAO

Alteração realizada: Deixado apenas os alarmes de Alto e Baixo;

Novo *setpoint* para alarme "Alto": 172.000;

Novo *setpoint* para alarme "Baixo": 30.000.

- Nome anterior: **TQ. COLETOR DE CONDENSADO**

Alteração realizada: Equipamento em manutenção, foi consertado após o período de análise dos alarmes.

- Nome anterior: **CONTROLE AJUSTE O2/AR**  
Novo nome: CONTROLE AVANÇADO DE AJUSTE DE O2/AR;  
Alteração realizada: Deixado apenas os alarmes de Alto e Baixo;  
Novo *setpoint* para alarme "Alto": 3,5;  
Novo *setpoint* para alarme "Baixo": 0,5.
- Nome anterior: **CONDENSADO PLANTA P/ DESAERADOR**  
Novo nome: CONDENSADO PARA O DESAERADOR  
Novo *setpoint* para alarme "Baixo": 0,0.
- Nome anterior: **PRES. ANEL LESTE TERCIARIO**  
Alteração realizada: Criado um temporizador de 15 segundos no alarme de alta pressão. Dessa maneira, breves oscilações na pressão não ocasionarão em ativação do alarme.
- Nome anterior: **COND. SOPRADORES SUPERAQUECEDOR**  
Novo nome: TEMPERATURA DO CONDENSADO SOPRADORES DE SUPERAQUECEDOR  
Novo *setpoint* para alarme "Alto": 350;  
Novo *setpoint* para alarme "Baixo": 200.
- Nome anterior: **VAPOR P/SOPRADORESGRUPO 1**  
Alteração realizada: A vazão nominal do soprador 2 do grupo 1 é maior do que o limite do alarme de vazão alta. Assim, todo momento que o soprador era utilizado, o alarme de alta era acionado. Para reduzir o número de ocorrências desse alarme, será modificado o soprador para readequá-lo as configurações da caldeira.

No dia 20 de maio, foi feita a primeira alteração nos alarmes da caldeira, que foi a modificação dos *bad-actors*. Após nove dias, houve uma nova coleta de dados e foram realizadas novas análises, de maneira a verificar a eficácia das modificações. Foi apurado que alguns alarmes necessitavam de novas alterações, pois não houve diminuição de suas ocorrências. Outros alarmes, por sua vez, apareceram pela primeira vez entre os *bad-actors*. Alguns alarmes não foram coletados anteriormente, porém não se encontrou o motivo desse acontecimento. Portanto, no histórico de ocorrências apresentado na [Figura 42](#) é possível verificar um súbito aumento na incidência de alarmes por conta da maior quantidade de alarmes historiados. Nesse novo histórico, o número de alarmes disparados diariamente era de 4.054.

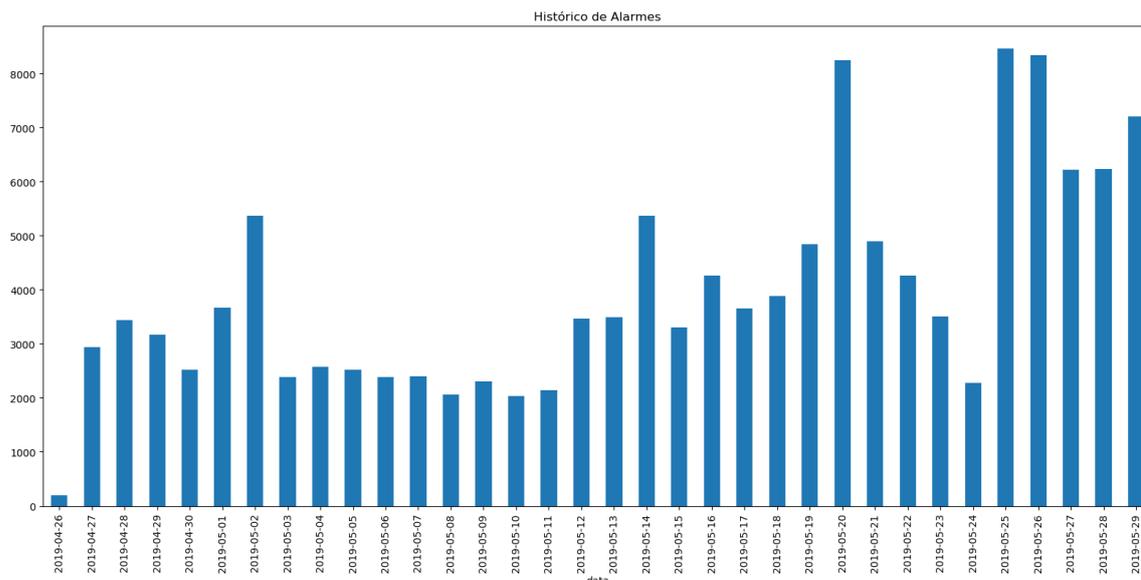


Figura 42 – Histórico de ocorrência de alarmes na Caldeira de Recuperação nos meses de abril e maio

Para verificar esses alarmes, foi desenvolvido um gráfico de Pareto, representado na Figura 43 com os vinte alarmes que mais ocorreram no período entre o dia 26 de abril e 29 de maio.

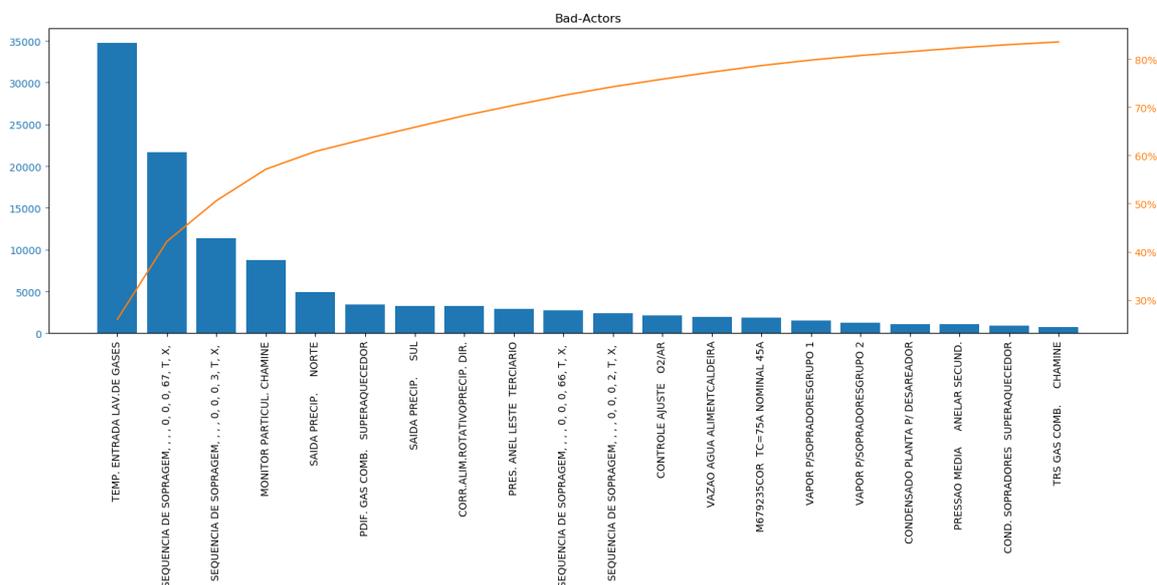


Figura 43 – Gráfico de Pareto com os vinte alarmes que mais ocorreram na Caldeira de Recuperação nos meses de abril e maio.

Em relação aos alarmes que foram corrigidos anteriormente, foram criados históricos para cada um deles, individualmente. Assim, é possível verificar se o tratamento sugerido a eles foi efetivo. Na Figura 44, é possível verificar o histórico de ocorrência do alarme "PDF. GAS COMB. SUPERAQUECEDOR".

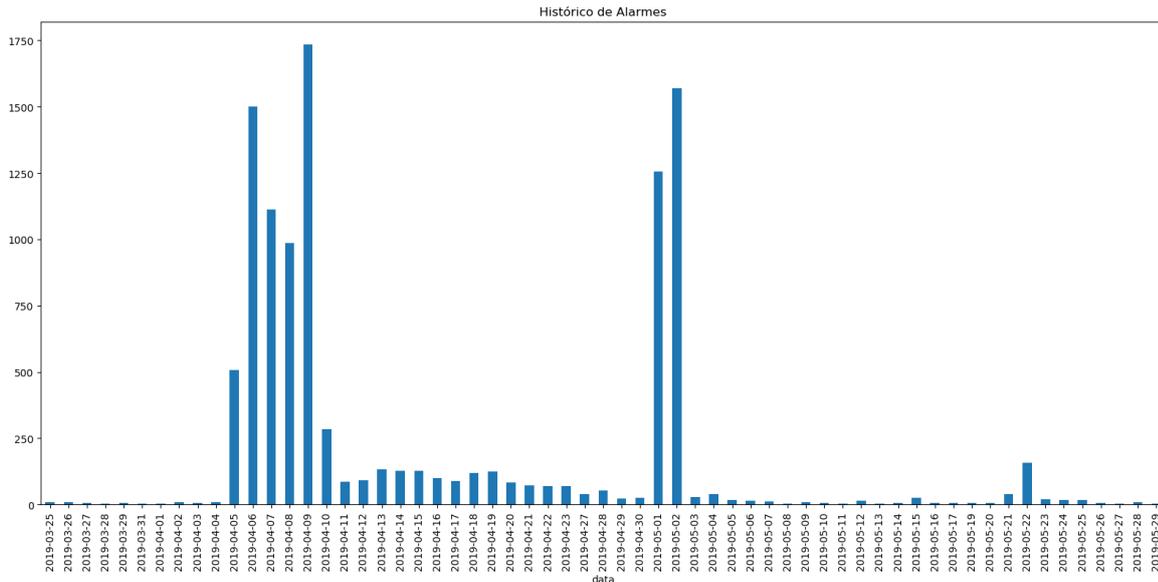


Figura 44 – Histórico de ocorrência do alarme PDIF GAS COMB SUPERAQUECEDOR

Com auxílio do gráfico de Pareto, apresentado na [Figura 43](#), foi realizada uma nova iteração das modificações dos alarmes. Esse trabalho ocorreu no dia 5 de maio e utilizou as técnicas apresentadas na [subseção 3.1.1](#) para corrigir os alarmes que ainda apresentavam problemas e os que ainda não haviam sido corrigidos.

#### 5.1.4 Predição dos Alarmes

Para realizar a predição dos alarmes, foram utilizadas 142 variáveis da Caldeira de Recuperação. Essas variáveis foram coletadas utilizando o *PI Datalink*, com um período de amostragem de trinta segundos e suas descrições e unidades de medida podem ser visualizadas no [Apêndice C](#). Foram selecionados, também, 22 alarmes para serem preditos. Esses alarmes são referentes aos equipamentos que mais entraram em falha no ano de 2018: turbo-bomba de água de alimentação, tanque de dissolução, ventilador induzido do lado norte da caldeira e ventilador de ar primário. Esses alarmes foram escolhidos com cuidado, pois, como verificado, há muitos alarmes mal configurados, que não representam uma situação de distúrbio da caldeira. Todos os alarmes preditos podem ser visualizados no [Apêndice B](#), para facilitar a identificação de cada um dos alarmes, foi atribuído um código para cada um deles. Esses códigos podem ser verificados, também, no [Apêndice B](#).

As variáveis da caldeira foram coletadas no período compreendido entre 24 de março de 2019 e 29 de maio de 2019, período no qual temos histórico de ocorrência dos alarmes. A retirada de *outliers* (dados que destoam dos demais) foi facilitada pelo *PI System*, já que os dados que apresentam tal condição são marcados com uma etiqueta de atenção. Portanto, excluiu-se os dados que apresentaram tal etiqueta, pois, de maneira geral, não foi possível verificar se tal condição aferia-se a uma condição normal do sistema.

Após a limpeza dos dados e com auxílio do algoritmo de verificação de tempo de vida do alarme, foram verificados os períodos nos quais um dos alarmes selecionados estava ocorrendo. Foi determinado, então, um período de tempo anterior à ocorrência do alarme para considerarmos como um tempo de "pré-alarme". A partir dessas inferências, é possível classificar cada conjunto de variáveis da caldeira em uma das seguintes classes: "NORMAL", "EM ALARME" ou "EM PRÉ-ALARME". Ao final da classificação, possuíamos vinte e dois conjuntos de dados, cada um classificado de acordo com o alarme correspondente.

Portanto, para cada alarme selecionado, será criado um modelo de predição. Como são muitos modelos a serem treinados, optou-se por um método de classificação que apresenta um menor período de treino comparado aos demais. Além disso, foi necessário uma redução na dimensionalidade da amostra. Assim, reduz-se o tempo de processamento e a necessidade de recursos computacionais, visto que, os computadores utilizados para o projeto são computadores comuns, equiparáveis a computadores pessoais.

O método utilizado para redução da dimensionalidade foi o *Principal Components Analysis* (PCA). O PCA realiza uma ortogonalização no conjunto de variáveis selecionadas para produzir um outro conjunto composto por variáveis linearmente não correlacionadas. Esse procedimento produz dados com dimensão menor do que os dados originais ou dados com igual dimensão. O *Scikit-Learn*, biblioteca do *Python* composta por vários algoritmos de aprendizado de máquina, possui uma função capaz de realizar essa análise em um grande conjunto de dados. Nela pode ser inserida a dimensão ou a variação retida desejada para o conjunto de variáveis finais. Os conjuntos de dados selecionados, quando aplicado o procedimento de PCA e definido que a variação retida desejada deveria ser de 0,95, resultaram em conjuntos de dados com dimensões entre 36 à 40 variáveis.

Tanto o PCA quanto o *Perceptron* Multicamadas necessitam que os dados sejam normalizados. Ademais, o treinamento da rede MLP necessita que todas as variáveis sejam numéricas. Portanto, após a retirada dos *outliers* é necessário transformar as variáveis booleanas e as etiquetas de estado "NORMAL", "ALARME", "PRÉ-ALARME" em números e, em seguida, normalizá-las. Para normalização, é utilizado outra função disponível na biblioteca do *Scikit-Learn*, a *StandardScaler*. Deve-se tomar cuidado ao salvar o modelo gerado pela normalização com os valores de máximo e mínimo para cada variável, para ser utilizado em novos conjuntos posteriormente e, assim, deixá-los todos uniformes.

Um problema que afeta algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado é o desbalanceamento de dados. Nesse problema, temos classes que ocorrem muito mais vezes que as demais. Como o MLP é sensível ao desbalanceamento, esse método acaba por valorizar as classes majoritárias em detrimento das minoritárias. No problema de classificação apresentado, possuímos muitas variáveis classificadas como "NORMAL" em relação às classificadas como "ALARME" e "PRÉ-ALARME". A fim de ilustrar esse problema, a [Figura 45](#) ilustra a quantidade de dados classificados como "NORMAL",

"PRÉ-ALARME" e "ALARME" para o conjunto referente ao alarme de VELOCIDADE TURBOBOMBA AGUA DE ALIMENTACAO. Assim, um modelo treinado sem considerar o desbalanceamento dos dados pode resultar em alta ocorrência de falsos negativos, ou seja, quando o estado real é definido por "ALARME" ou "PRÉ-ALARME", o modelo prediz como "NORMAL".



Figura 45 – Gráfico a quantidade de ocorrência de cada classe referente ao conjunto de dados do alarme de VELOCIDADE TURBOBOMBA AGUA DE ALIMENTACAO

Para contornar esse problema, BARELLA [34], em sua tese, define algumas soluções: (a) a subamostragem, na qual dados da classe majoritária são retirados aleatoriamente, deixando a amostra final com uma proporção de 1:1:1; (b) a sobre-amostragem, em que dados da classe minoritária são eleitos aleatoriamente para serem replicados até que a proporção entre as classes se igualem; e (c) *Synthetic Minority Over-sampling Technique* (SMOTE), técnica para geração artificial de classes minoritárias utilizando interpolação dos dados.

Antes de aplicar a técnica de amostragem, é necessário separar a base de treino e a base de teste. Assim, é possível delimitar que um elemento da base de treino não estará presente na base de teste. Essa separação em dois grupos é necessária, porque, assim, assegura-se que o modelo não apresenta *overfitting*, ou seja, não depende de um conjunto de dados específico para conseguir prever sua classe.

Com os dados separados em dois grupos, foi iniciada a etapa de verificação de qual melhor método de aprendizado de máquina para o problema de classificação de dados da caldeira, sendo que esse método deve apresentar o menor tempo de treino possível. Para isso, foi escolhido o alarme "VAZAO AGUA ALIMENTCALDEIRA" para ser predito sua ocorrência ou pré-ocorrência. Foram utilizados três tipos distintos de algoritmos de

classificação *Gaussian Naive Bayes* (GNB), Máquinas de Vetor de Suporte (SVC) e *Perceptron* Multicamadas (MLP). Os resultados foram:

- **GNB:**

Tempo de treino: 0,15617 segundos

Taxa de acerto: 0,73888

Dimensão de dados utilizada: 39

- **SVC:**

Tempo de treino: 525,92982 segundos

Taxa de acerto: 0,55747

Dimensão de dados utilizada: 3

- **MLP:**

Tempo de treino: 874,86029 segundos

Taxa de acerto: 0,76339

Dimensão de dados utilizada: 39

Embora o algoritmo GNB tenha apresentado uma taxa de acerto equiparável com o algoritmo MLP, quando os acertos são normalizados, a quantidade de falsos negativos é tão elevada que inviabiliza a sua utilização no projeto. O algoritmo SVC necessita de baixas dimensões dos dados utilizados, pois, ao aumentá-la, o consumo de processamento é elevado a tal ponto que, para criar um modelo com 30 dimensões, o tempo de processamento ultrapassava o de três dias. Além disso, o SVC previu muitos "ALARMES" como "PRÉ-ALARMES", deixando-o aquém dos resultados apresentados pelo MLP. Os resultados desse teste pode ser visualizado nas matrizes de confusão normalizadas da [Figura 46](#).

Após decidir-se pelo uso de MLP, foram verificados os melhores parâmetros para:

- *solver*: método de propagação utilizado (lbfgs, sgd ou adam);
- *alpha*: termo de regularização ou penalidade;
- *hidden\_layer\_sizes*: define a quantidade de camadas e quantos *Perceptrons* há em cada camada;
- *max\_iter*: define o número máximo de iterações;
- *random\_state*: semente (*seed*) utilizada pelo gerador de números aleatórios.

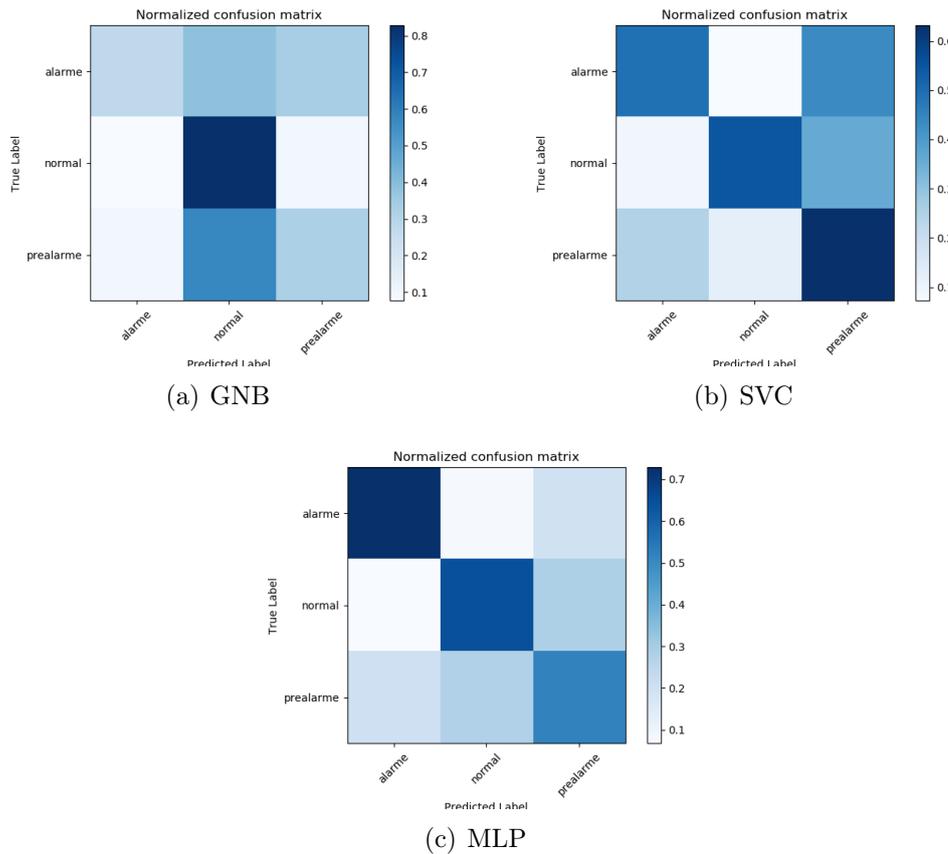


Figura 46 – Matriz de confusão para diferentes algoritmos de classificação

Empiricamente, os melhores parâmetros encontrados resultaram na matriz de confusão apresentada na Tabela 4. Os parâmetros são para *solver*, lbfgs, para *alpha*,  $1e-10$ , para *hidden\_layer\_sizes*, (50, 40, 30, 25, 20, 15, 10, 5), para *max\_iter*, 200 e para *random\_state*, 1.

Tabela 4 – Matriz de confusão gerada pelo MLP com os melhores parâmetros encontrados empiricamente

Real \ Predito	Alarme	Normal	Pré-Alarme
Alarme	0,71	0,05	0,24
Normal	0,05	0,62	0,33
Pré-Alarme	0,17	0,24	0,58

Posteriormente, para sintonizar os parâmetros, foi utilizada a função do *Scikit-Learn* chamada de *gridSearchCV()*. Nela, são definidos vetores ou intervalos com possíveis valores que os parâmetros podem apresentar. Todos os valores são testados e os que apresentam melhores previsões são escolhidos. Esse algoritmo pode ser visualizado no Algoritmo 5.2.

Algoritmo 5.2 – Código para ajustar parâmetros do MLP

```
parameters = {'solver': ['lbfgs'], 'max_iter': [1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600,
1700, 1800, 1900, 2000], 'alpha': 10.0 * -np.arange(1, 10), 'hidden_layer_sizes': np
.arange(10,15), 'random_state': [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]}
```

```

modelg = GridSearchCV(MLPClassifier(), parameters, n_jobs=-1)
modelg.fit(train, train_labels)
print(modelg.score(train, train_labels))
print('Melhores_parametros:')
print(modelg.best_params_)

```

A função de otimização paramétrica encontrou os seguintes parâmetros ideais: para *solver*, lbfgs; para *alpha*, 1e-09; para *hidden\_layer\_sizes*, (14); para *max\_iter*, 2000; para *random\_state*, 4. Esses parâmetros, produziram a matriz de confusão apresentada na [Tabela 5](#).

Tabela 5 – Matriz de confusão gerada pelo MLP com os melhores parâmetros encontrados pela função paramétrica

Real\Predito	Alarme	Normal	Pré-Alarme
Alarme	0,72	0,05	0,23
Normal	0,07	0,70	0,23
Pré-Alarme	0,21	0,16	0,63

Como a função de otimização paramétrica não levou em consideração na análise múltiplas camadas de *Perceptron*, foram inseridos os parâmetros de *hidden\_layer\_sizes* encontrados empiricamente no conjunto de parâmetros encontrados pela função. Os resultados da união dos parâmetros podem ser vistos na matriz de confusão da [Tabela 6](#).

Tabela 6 – Matriz de confusão gerada pelo MLP com os melhores parâmetros encontrados pela função paramétrica e com as múltiplas camadas encontradas empiricamente

Real\Predito	Alarme	Normal	Pré-Alarme
Alarme	0,74	0,04	0,22
Normal	0,03	0,81	0,16
Pré-Alarme	0,10	0,12	0,78

Esse parâmetros foram utilizados, então, para criar modelos para os outros 21 alarmes. Para apresentar as predições desses modelos de maneira mais visual, optou-se por criar uma tela no sistema supervisorio indicando a situação de cada alarme. O *PI System* possui um pacote para leitura e escrita nas variáveis presentes nele por meio de uma API WEB; entretanto, na WestRock, tal pacote não está incluso na versão disponível. Portanto, a fim de se proceda à coleta dos dados da caldeira para classificação, é necessário o uso do *PI Datalink*, tornando essa integração do tipo "Integração por Arquivos". O *Python* lê os dados atuais da caldeira por meio de um arquivo *Excel*, faz as predições e retorna os rótulos de classificação em outro documento *Excel* para inserção no *PI System*. Esse fluxo pode ser visualizado na [Figura 47](#).

Como realizado com os controladores, no *PI AF*, foram definidos dois eventos: em alarme e em pré-alarme. A partir desses eventos, criou-se notificações para o supervisor

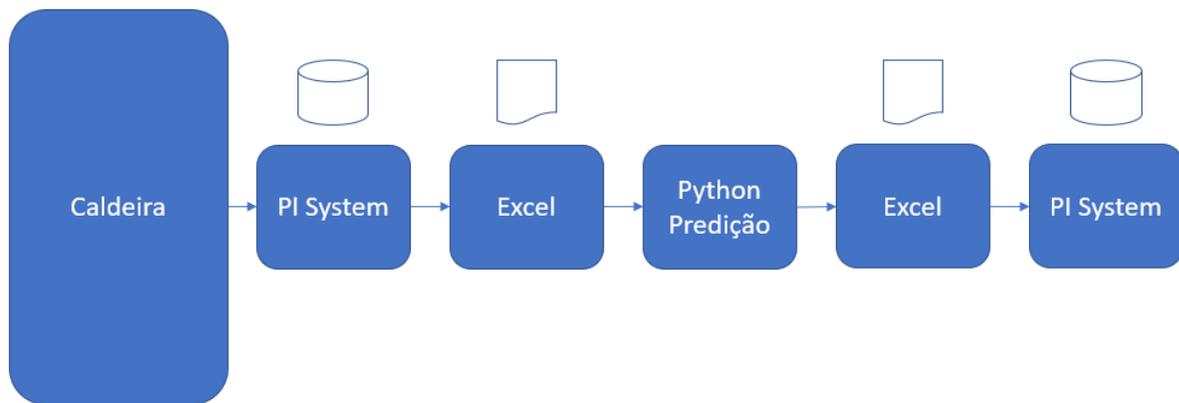


Figura 47 – Fluxo da integração por arquivos entre *PI System* e *Python*

da caldeira poder estar ciente dos problemas antes que esses ocorreram. Além disso, foi desenvolvido, com auxílio do *PI Coresight*, uma tela identificando a situação de cada alarme. Essa tela pode ser visualizada na [Figura 48](#), juntamente com o modelo de e-mail enviado ao supervisor.

Na [Figura 48\(a\)](#), é possível verificar que os alarmes preditos podem estar em três estados distintos, dependendo da cor do círculo que o representa. A cor verde indica que o alarme não está acionado, ou seja, estamos em uma operação normal; quando o círculo está amarelo, estamos em um estado de pré-alarمة; vermelho significa que o respectivo alarme está ocorrendo; e branco indica que há um erro de comunicação entre o sistema de predição e o *PI System*. O alarme possui indicações da probabilidade de um alarme ser predito como "alarme" (A), um pré-alarمة ser predito como "pré-alarمة" (P), um estado de normalidade ser predito como "normal" (N) e a acuratividade geral (Ac). Caso uma dessas probabilidades seja menor que 50 %, o alarme é etiquetado com um quadrado vermelho, indicando que o usuário deve ter cuidado ao utilizar essa predição.

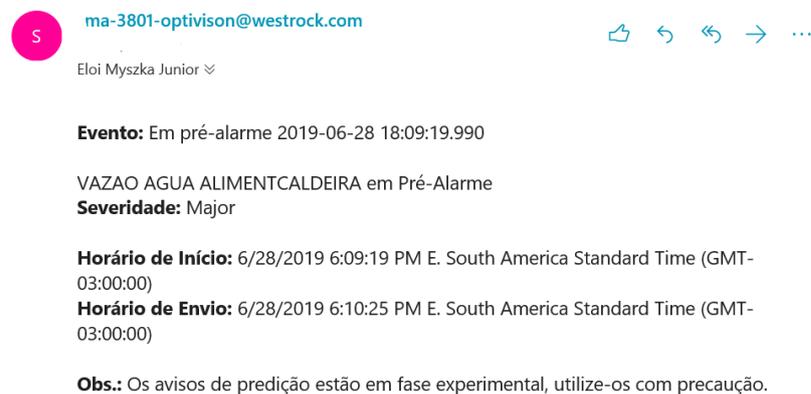
O e-mail enviado pelo sistema de predição pode ser visualizado na [Figura 48\(b\)](#). Nele, é mostrado qual o estado do alarme, horário de início do estado predito e horário de envio da mensagem. A análise dos resultados obtidos com a implementação das soluções propostas para os três eixos é apresentada na próxima seção.

## 5.2 Análise dos resultados

Nessa seção, serão discutidos os resultados obtidos por meio da implementação das soluções propostas ao três eixos. Para isso, a seção foi dividida em três subseções [5.2.1](#), [5.2.2](#) e [5.2.3](#), que correspondem ao sistema de Relatos de Incidente, ao Sistema Supervisório e à Gestão e Predição de Alarmes.



(a) Tela do sistema supervisorio das predições de alarmes



(b) E-mail enviado ao supervisor na incidencia de um pré-alarme

Figura 48 – Sistema supervisorio das predições dos alarmes da caldeira

### 5.2.1 Relatos de Incidente

O *Software* implementado permitiu ao operador receber *feedback* sobre os problemas apontados por ele, fazendo com que ele reflita sobre o incidente e, ainda, apresente uma fácil execução. Desse modo, a solução proposta se mostrou um bom instrumento para aumentar o engajamento dos funcionários em relação aos problemas que acontecem em área. Ademais, a disponibilização da informação de incidente em área passou a se dar em tempo real, sendo que, anteriormente, levava até três dias.

Após a implementação do sistema de relatos no DRU, o número de relatos realizados durante um mês aumentou 57 % comparado com a média dos meses anteriores. O gráfico da Figura 49 ilustra a quantidade de relatos produzidos em cada fase do projeto. Após a total implementação em todo o departamento, o número de participação aumentou consideravelmente. Isso demonstra que, ao trazer praticidade na comunicação no âmbito do trabalho, pode-se reduzir, inclusive, os danos a equipamentos e pessoas.

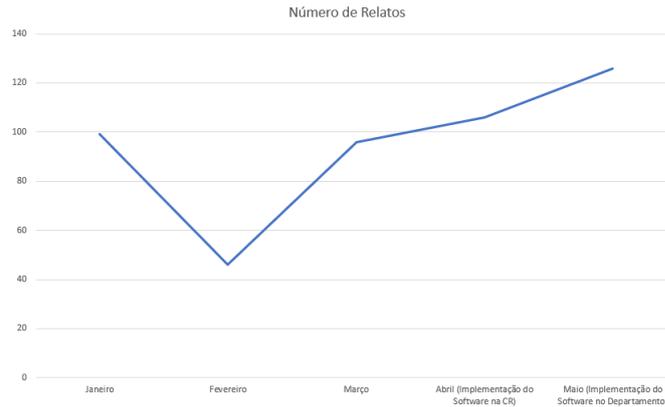
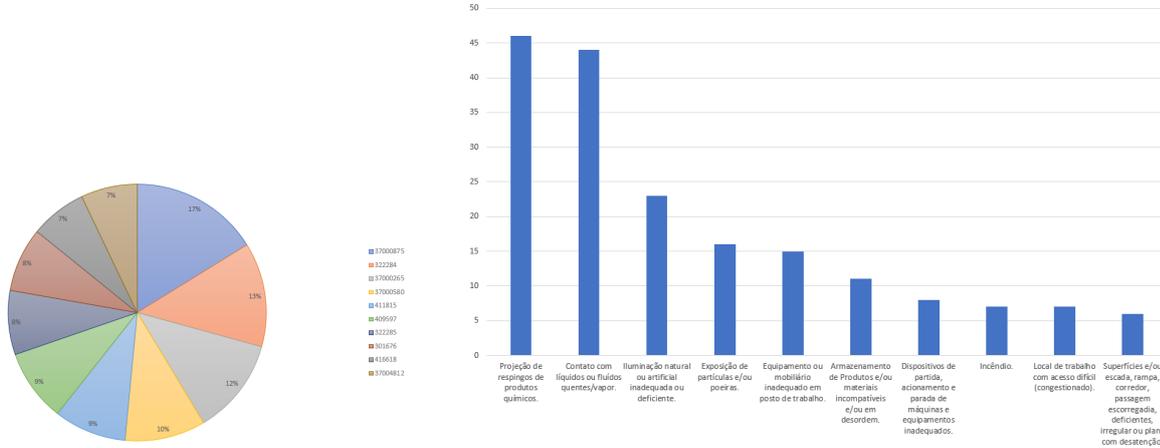


Figura 49 – Gráfico com a quantidade de relatos realizados mês a mês

Com o novo sistema proposto os dados estão todos digitalizados, é possível fazer inferências e análises sobre o departamento e sobre como ele cuida da segurança e da integridade das pessoas e dos equipamentos. Utilizando ferramentas comuns em escritórios, como *Excel* ou *Google Sheets*, é possível construir gráficos com os operadores que mais realizaram relatos, com as áreas mais afetadas ou com os perigos aos quais as pessoas estão mais suscetíveis na área, como ilustradas na Figura 50.



(a) 10 Funcionários que mais realizaram relatos (b) Perigos aos quais os operadores mais estiveram suscetíveis

Figura 50 – Análises em gráfico dos incidentes na área do DRU

O *software* implementado está de acordo com os requisitos solicitados: (a) há a disponibilização dos relatos de incidente em tempo real para o Supervisor; (b) as informações salvas na *Azure* possuem *backup* e só podem ser acessadas por pessoas previamente autorizadas e que possuem conta no serviço de *login* da WestRock; (c) os Mestres são notificados sempre que há uma modificação no estado do relato; e (d) ocorre a integração entre o *Trello* e Sistema de Relatos.

Como resultado, foi possível mitigar os principais problemas apresentados pelo

processo anteriormente. Foi possível reduzir o número de informações perdidas e pessoas envolvidas no fluxo de informações, foi reduzido o tempo para recebimento de relatos e permitiu-se que o operador recebesse *feedback* dos incidentes relatados por ele. A resolução desses problemas, agilizou o processo de relato de incidentes, possibilitou que seja implantado estudos sobre equipamentos que mais entraram em falha, facilitando a manutenção preventiva, e aumentou a motivação dos operadores em relatar incidentes no chão-de-fábrica.

### 5.2.2 Sistema Supervisório

Utilizando o novo sistema supervisório dos controladores, o supervisor pode estar sempre atento as modificações realizadas pelos operadores no processo. Pode, também, verificar se os equipamentos presentes nas malhas de controle, como controladores, atuadores ou sensores, estão funcionando normalmente. Um novo fluxo de operação foi criado, o qual foi ilustrado na [Figura 51](#). Nele, o supervisor pode verificar quais malhas estão em manual, verificar as informações específicas do controlador e, se desejar, acompanhar os valores das variáveis controladas em períodos de tempo escolhidos. Se um problema for encontrado ou se a operação dos equipamentos não estiver sendo realizada como deveria, o supervisor pode telefonar na sala de controle e verificar a situação do sistema.

A equipe de instrumentação, com auxílio do sistema supervisório, pode verificar se os controladores estão sendo utilizados e se os parâmetros configurados estão bem ajustados. Não é mais necessário se deslocar até a sala de controle para utilizar o SDCD, já que as análises estão acessíveis a todos que estão conectados à Internet. Além disso, não é necessário que o DRU comunique os problemas nos controladores, pois o sistema notifica a equipe ativamente sobre as falhas.

O Sistema Supervisório agora possui mais informações importantes sobre a Caldeira de Recuperação. Todas as informações referentes as malhas de controle estão disponíveis para qualquer funcionário do departamento. Ademais, o sistema é capaz de alertar o supervisor e a equipe de instrumentação sobre situações de falhas ou condições anormais dos equipamentos por e-mail. Isso possibilita uma redução no tempo de identificação de problemas e facilita a compreensão de como o operador controla os processos da caldeira.

### 5.2.3 Gestão e predição dos alarmes

A última iteração do trabalho de reconfiguração dos alarmes resultou em uma grande diminuição no número de incidência de notificações. Um histórico de todo ciclo de modificações pode ser observado na [Figura 52](#). A partir desse histórico, foi possível verificar uma redução de 61 % das ocorrências de alarmes. Anteriormente, a média diária era de 3398 alarmes, atualmente, com a implementação do projeto, esse número reduziu-se



Figura 51 – Fluxo de operação realizado pelo supervisor para verificar problemas no controle dos equipamentos da caldeira

para 1323 ocorrências.

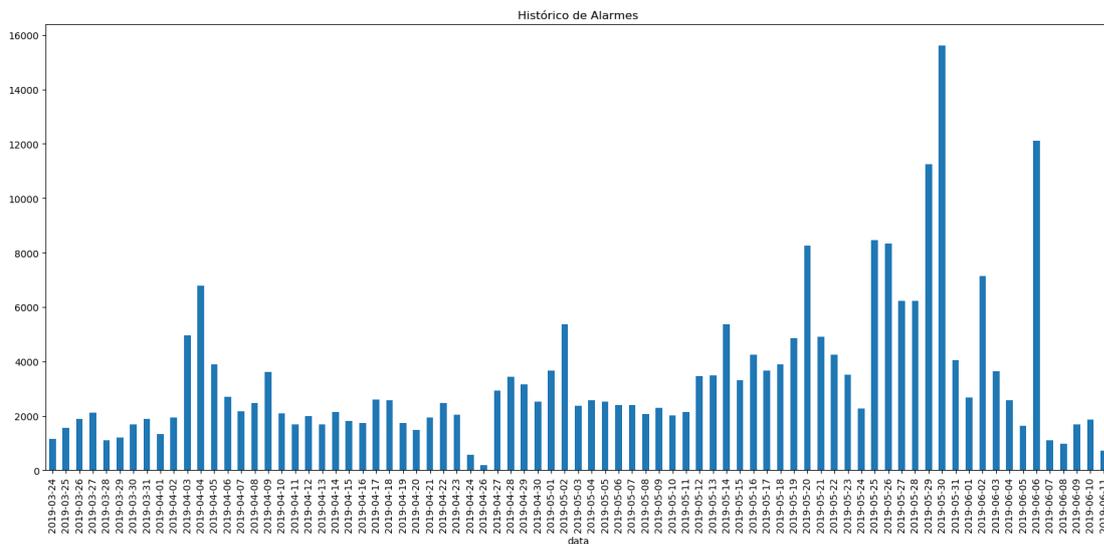


Figura 52 – Histórico de ocorrência de alarmes na Caldeira de Recuperação durante todo o período do projeto

Algumas datas importantes:

- Entre os dias 03 de abril e 08 de abril, ocorreu uma parada na caldeira;
- No dia 24 de abril, ocorreu a primeira coleta de alarmes. Como a coleta ocorreu na metade do dia, não há dados em sua totalidade;
- No dia 20 de maio, houve a primeira correção dos alarmes;
- No dia 29 de maio ocorreu a segunda coleta de alarmes. Nela, foram adquiridos todos os incidentes presentes no historiador. Infelizmente, não foi possível encontrar os dados referentes ao dia 25 de abril, nem parte dos dados do dia 26 do mesmo mês. Nessa coleta, alarmes que não foram coletados anteriormente, passaram a ser historiados. Portanto, houve um acréscimo no número de incidência de alarmes a partir do dia 26 de abril.
- Nos dias 29 e 30 de maio, houve paradas de caldeira;
- No dia 5 de junho, ocorreu a segunda alteração nos alarmes na caldeira;
- No dia 6 de junho, houve uma nova parada na caldeira;
- Por fim, no dia 11 de junho, ocorreu a última coleta de dados.

As paradas devem ser analisadas com cuidado, pois, como a caldeira encontra-se em uma situação anormal, há uma grande ocorrência de alarmes. A esse evento denominamos de avalanche de alarmes.

Além disso, com os algoritmos criados, é possível verificar constantemente quais alarmes estão mais afetando o processo. Também, pode-se fazer comparativos entre a eficiência de diferentes operadores por meio da análise de tempo de reconhecimento. Na [Tabela 7](#), é possível verificar a diferença entre o tempo de reconhecimento de dois turnos distintos para o alarme de "PARTICULADOS CHAMINÉ".

Tabela 7 – Tempo de reconhecimento do alarme de Particulados da Chaminé por dois turnos diferentes

<b>Data</b>	<b>Turno 1</b>	<b>Turno 2</b>
08/04	00:36:12	03:27:00
09/04	00:14:40	00:30:34
10/04	00:07:24	00:15:10
11/04	00:19:27	00:14:30
12/04	00:04:38	00:15:12
13/04	00:17:56	00:13:06
Média	00:16:43	00:49:15

Os resultados obtidos pelas predições dos modelos de redes de *Perceptron* Multicamadas foram positivos na maioria dos alarmes. O tempo médio de treino foi equivalente a 33 minutos. A precisão, que embora não seja um bom indicador para analisar o desempenho da predição, foi de 0,98. Na tabela [Tabela 8](#), temos o tempo de treino e de teste, além da precisão de predição de cada um dos alarmes escolhidos para o projeto.

Tabela 8 – Resultados da utilização de MLP para criação de modelos de classificação de alarmes.

<b>Código Alarme</b>	<b>Tempo de Treino (em segundos)</b>	<b>Tempo de Teste (em segundos)</b>	<b>Taxa de Acerto</b>
101	2576.98	0.17	0.84
102	1054.67	0.05	1
103	1102.61	0.06	1
104	3060.36	0.23	1
105	4902.56	0.22	1
106	683.49	0.2	1
107	1008.23	0.1	1
201	1922.98	0.09	0.99
202	3681.52	0.14	0.95
203	4024.78	0.15	0.93
204	3632.76	0.11	0.89
301	1025.13	0.07	1
302	3147.35	0.22	1
303	1312.37	0.19	0.99
401	2120.67	0.08	0.98
402	282.18	0.03	1
403	2082.75	0.09	0.98
404	421.25	0.03	1
405	432.20	0.05	1
406	446.50	0.03	1
407	1242.95	0.19	1
501	3602.02	0.48	1
<b>Média</b>	<b>1989.38</b>	<b>0.14</b>	<b>0.98</b>

Para ilustrar melhor os resultados, foram utilizadas matrizes de confusão. Essas matrizes são ferramentas amplamente utilizadas na área de aprendizado de máquina para identificar a taxa de acerto de um algoritmo de classificação. Nela, as linhas representam a classe real do conjunto de dados e as colunas a classe predita. Assim, é possível verificar a taxa de acertos do algoritmo para cada uma das classes e analisar a quantidade de falsos

positivos e falsos negativos presentes na classificação. As figuras 53, 54 e 55 apresentam as matrizes de confusão referentes a modelos que possuem acerto maior que 60 % para os rótulos "normal", "pré-alarme" e "alarme". Em especial, entre os modelos que apresentaram os melhores resultados, temos os seguintes alarmes:

- O alarme 101 é referente a água de alimentação da caldeira, importante por notificar que a caldeira possui vazão de água suficiente para não ocorrer a fusão de seus componentes. O resultado da predição pode ser visualizado na Figura 53(a);
- O alarme 104 é referente ao pH da água de alimentação. É importante, pois, para não oxidar os componentes da caldeira, a água de alimentação deve estar sempre com pH elevado, acima de 9. O resultado da predição desse alarme pode ser visualizado na Figura 53(c);
- O alarme 403 é referente a quantidade de enxofre reduzido nos gases de combustão da chaminé. Esse alarme tem importância ambiental e salienta que a caldeira está dentro das regulamentações governamentais;
- O alarme 501 é referente à vazão de vapor produzido pela caldeira. Ao soar, indica que a vazão está abaixo do pré-determinado para suprir as necessidades da fábrica.

Como é possível visualizar pelos valores presentes nas matrizes, o algoritmo acertava a classificação dos dados na maioria das vezes, sendo que, na maior parte das matrizes, as taxas de acerto de classes específicas superavam 70 %. Houve casos, entretanto, que os resultados foram de medianos a ruins. Nos alarmes 107 e 407, ilustrados respectivamente nas Figuras 56(b) e 56(e), houve certa confusão na classificação entre "Alarme" e "Pré-Alarme". Já nos alarmes 102, 202 e 301, ilustrados pelas Figuras 56(a), 56(c) e 56(d), houve uma situação mais crítica, as classes confundidas foram "Normal" e "Alarme". Por fim, a predição dos alarmes 201 e 406 não apresentou bons resultados. A predição do alarme 201, referente ao nível do tanque de dissolução, classificou em apenas 17 % das vezes um alarme como alarme, como pode ser visualizado na figura 57(a). Já a predição do alarme 406, ilustrada na matriz de confusão da Figura 57(b), classificou em 43 % das vezes um alarme como "normal". O alarme 406, como mostrado no Apêndice B, é referente aos gases de combustão presentes na chaminé da caldeira.

A fim de verificar como a predição desses alarmes seria se fosse aplicado o método de Máquina de Vetor de Suporte (SVC) para classificação, foi escolhido o alarme 301 para ser classificado. Os resultados para predição do alarme 301, utilizando MLP e SVC, podem ser visualizados na Figura 58.

Observando-se que o alarme 301 foi predito de melhor maneira pelo algoritmo SVC, é possível perceber, que, dada a diferença entre os equipamentos, talvez um bom caminho a ser seguido para predição dos alarmes da Caldeira de Recuperação, seja a utilização de

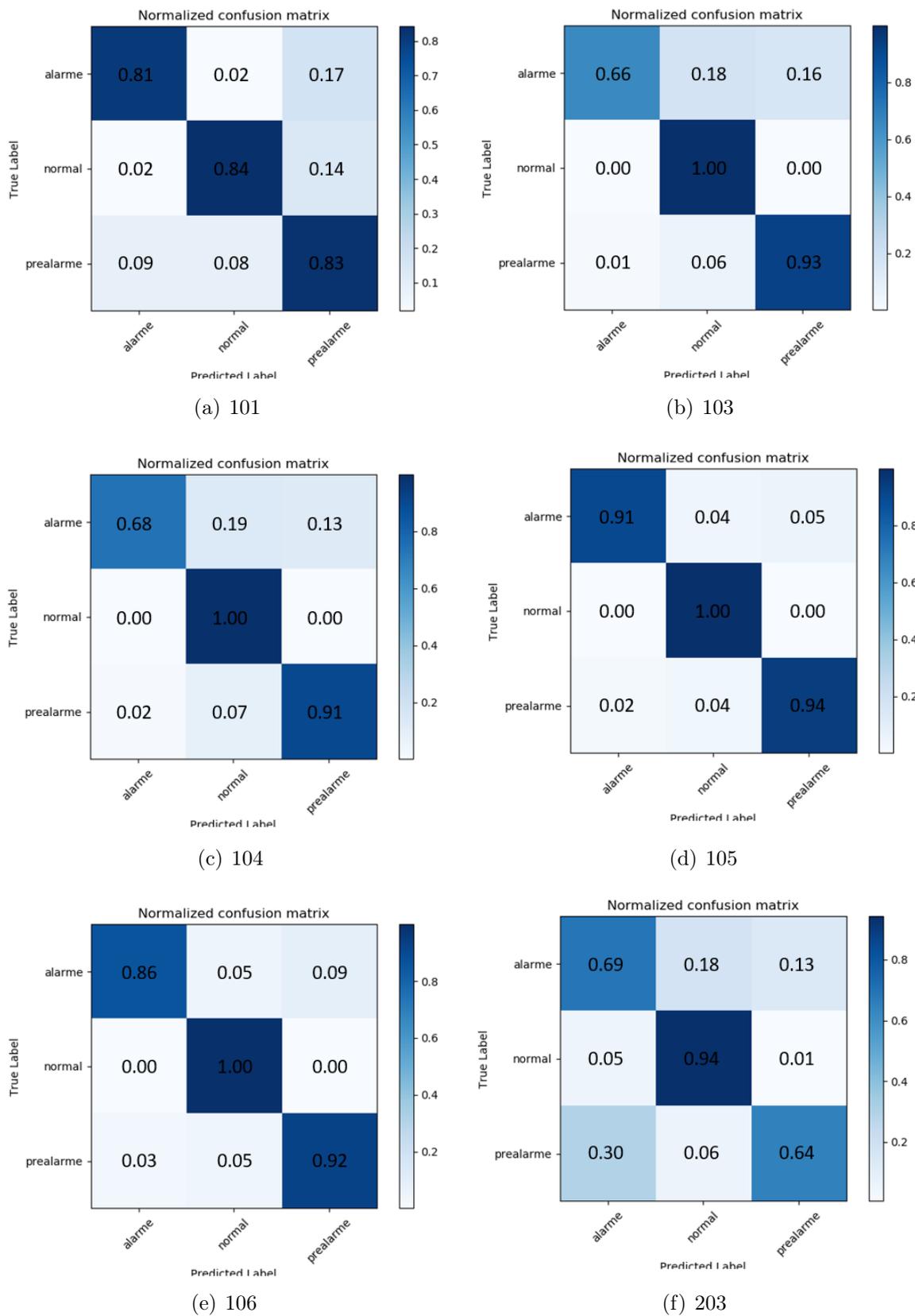


Figura 53 – Matriz de confusão para os alarmes que apresentaram uma boa predição pelo algoritmo de MLP, primeira parte

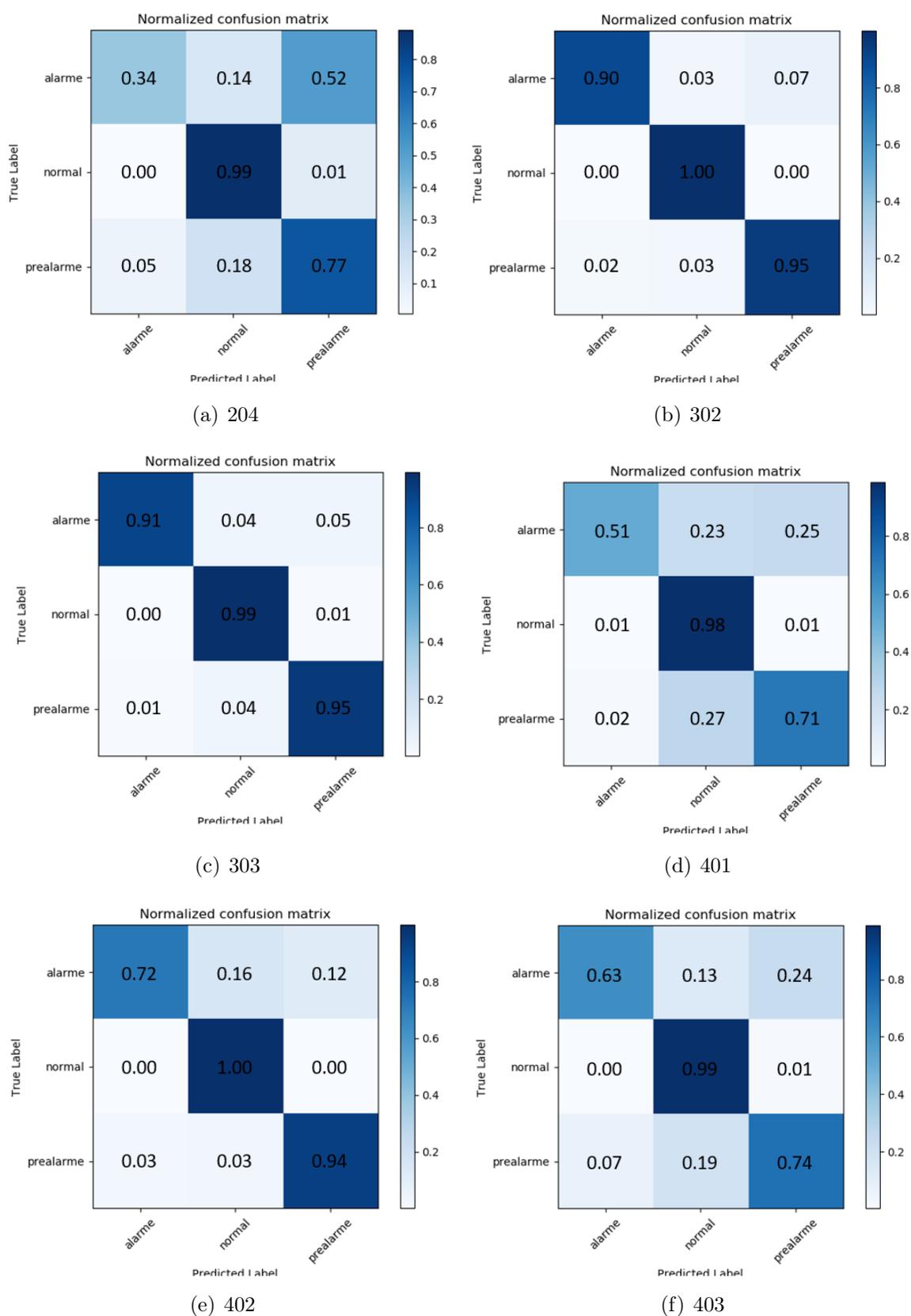


Figura 54 – Matriz de confusão para os alarmes que apresentaram uma boa previsão pelo algoritmo de MLP, segunda parte

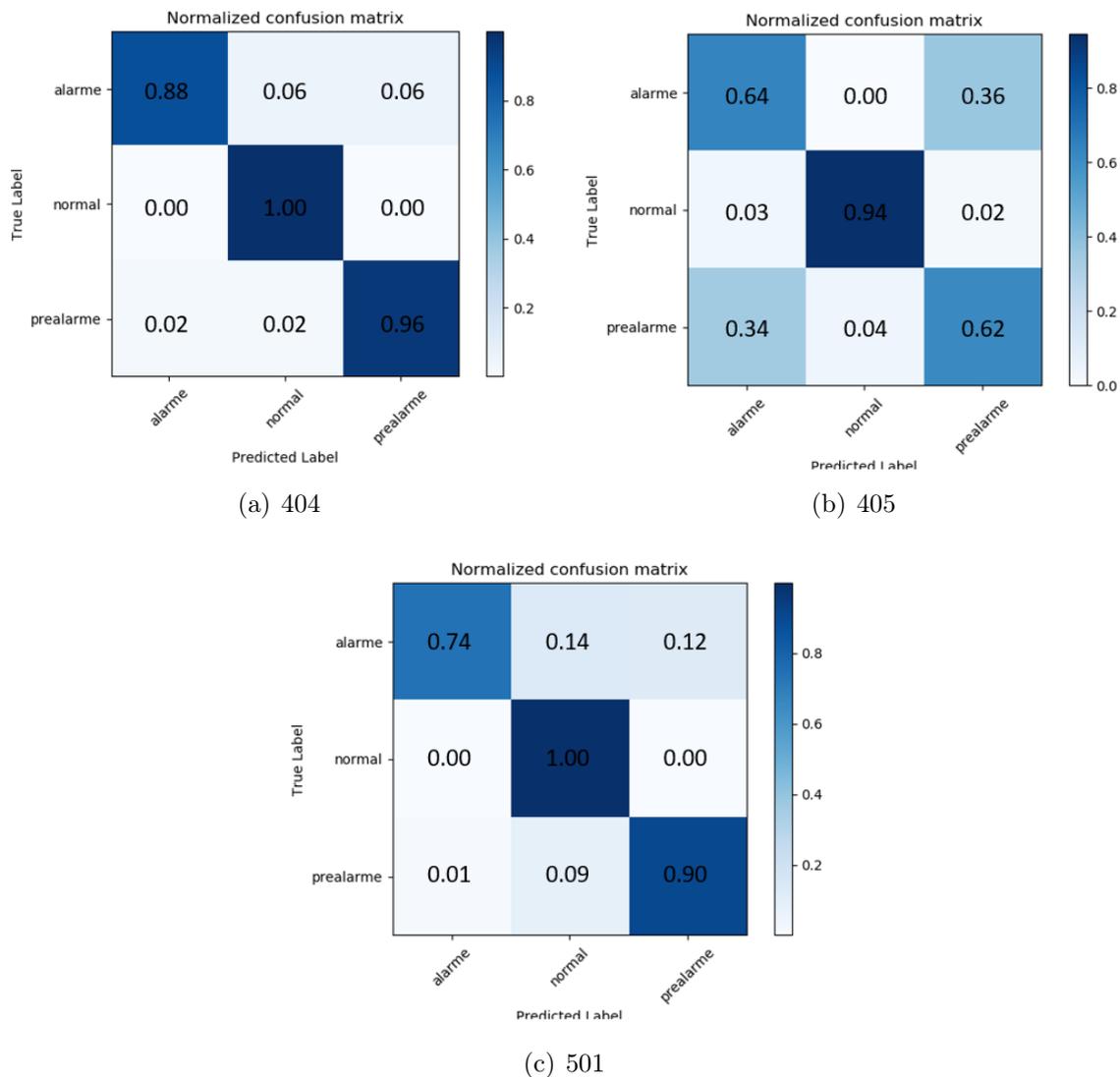


Figura 55 – Matriz de confusão para os alarmes que apresentaram uma boa predição pelo algoritmo de MLP, terceira parte

diferentes métodos de aprendizado de máquina. Sobre a integração entre os modelos e o *PI System*, o tempo de leitura de dados foi, em média, de 9,20 segundos. O tempo de escrita foi um pouco menor: 7,35 segundos. Ambos foram superiores ao tempo de teste dos modelos, que, como visto na Tabela 8, leva em torno de 3 segundos para predição de todos os alarmes somados.

Os requisitos propostos foram parcialmente seguidos. O número de ocorrência de alarmes sofreu drástica redução, entretanto não atingiu os níveis definidos pela ISA 18.2. Foram desenvolvidos algoritmos em *Python* que poderão ser utilizados por outras pessoas para análise dos alarmes da Caldeira ou outros equipamentos. Houve, também, a extinção dos principais *bad-actors* propostos, o que resultou em melhora na confiabilidade do sistema. A predição dos alarmes possibilitou aumentar o tempo que a operação e supervisão da Caldeira têm para a tomada de decisão. Além disso, o sistema de alarmes

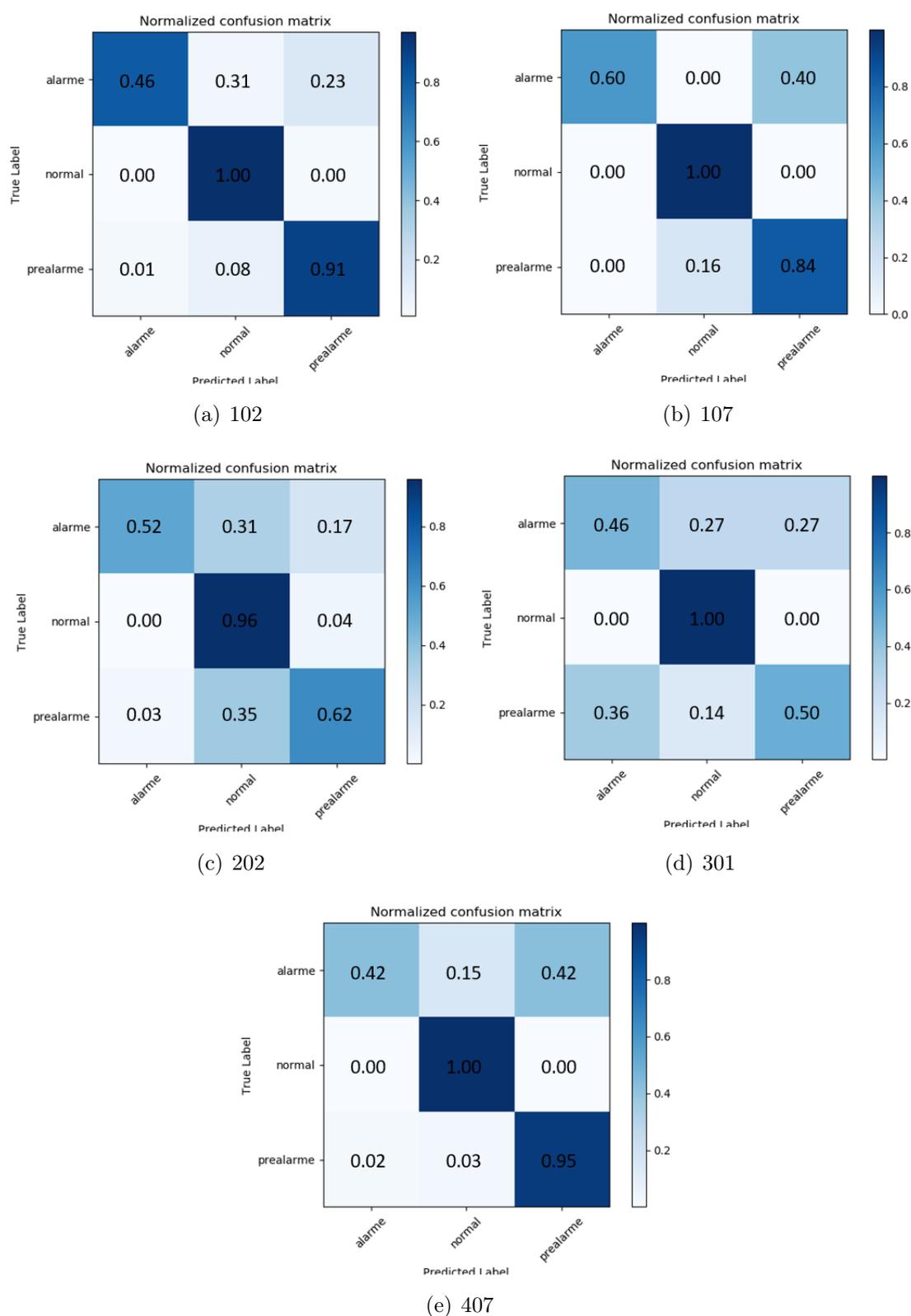


Figura 56 – Matriz de confusão os alarmes preditos de maneira mediana pelo MLP

começou a ser visto com melhores olhos pela equipe de operação, dada a melhora em sua confiabilidade.

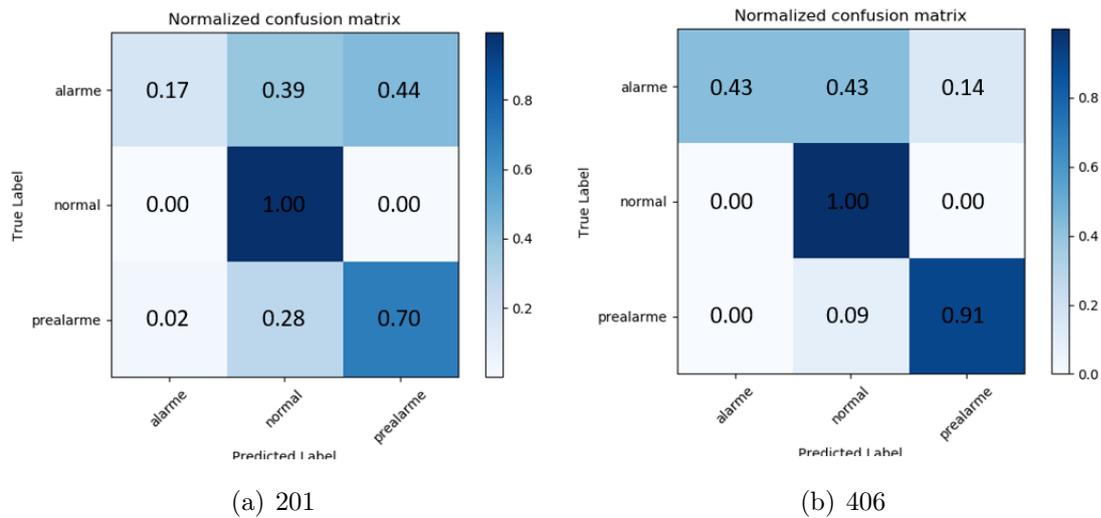


Figura 57 – Matriz de confusão os alarmes com resultados ruins de predição

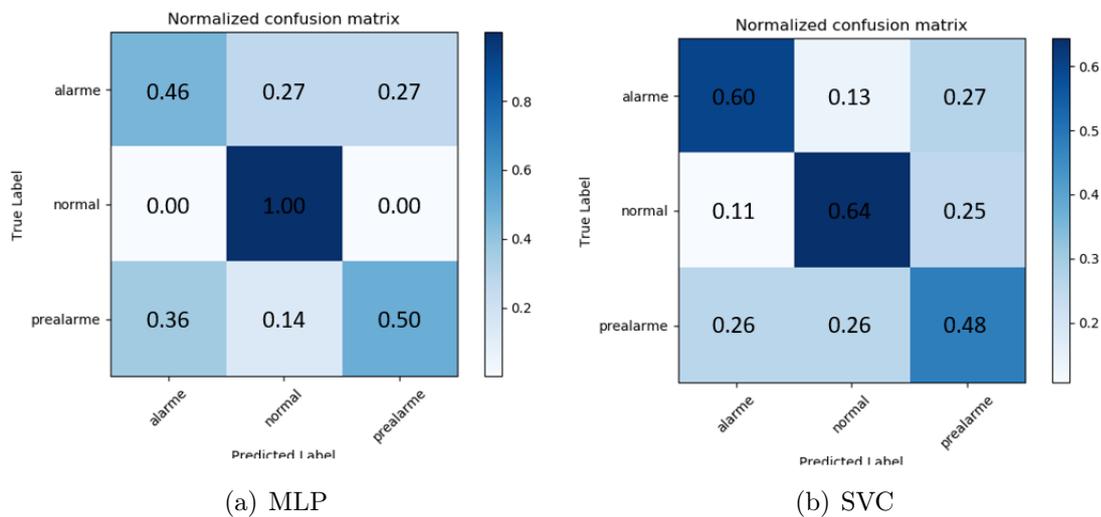


Figura 58 – Matriz de confusão para classificação do alarme 301 utilizando MLP e SVC

## 5.2.4 Conclusões

Com a implementação da automatização dos sistemas de segurança da Caldeira de Recuperação, houve melhora na comunicação entre Operação e Supervisão. Isso possibilitou uma maior motivação dos operadores em identificar problemas no chão-de-fábrica e relatá-los ao Supervisor. O tempo para transmissão da informação passou de dias para minutos, deixando o processo mais ágil e dando, aos funcionários, insumos para a resolução de problemas fabris. O Sistema Supervisório ativo facilitou a identificação de problemas na caldeira e possibilitou à equipe de Instrumentação a localização de sensores, atuadores e controladores com problemas. O sistema de alarmes passou a apresentar maior confiabilidade. A supervisora da caldeira, por meio desse sistema, conseguiu encontrar problemas crônicos no equipamento, que há tempo não tinham solução. Os operadores já veem o

---

sistema de alarmes como mais confiável e aos poucos passam a acompanhar melhor suas notificações. Embora a predição dos alarmes esteja em um estado inicial, ela já facilita a compreensão de causa e efeito em cada alarme e aos poucos se vislumbra sua utilização para a manutenção preditiva.



## 6 Considerações finais e perspectivas futuras

O processo de recuperação de licor preto é necessário para trazer maior competitividade, melhor cuidado ambiental e menor custo do papel fabricado pelas indústrias papeleiras. A Caldeira de Recuperação, como equipamento essencial ao processo de recuperação, que possui um alto custo de compra e manutenção e ainda trabalha a temperaturas e pressões elevadas, precisa de dispositivos confiáveis e bem adaptados às regulamentações de segurança. Assim, todos os operadores e os próprios equipamentos podem permanecer seguros em relação a possíveis adversidades.

O presente projeto definiu três eixos principais a serem melhorados nos processos de segurança da caldeira da WestRock. O primeiro consistia na dificuldade de comunicação entre Operação e Supervisão. O segundo, na subutilização do Sistema Supervisório e, o terceiro, na falta de confiabilidade do sistema de alarmes. Para resolução desses problemas, foram utilizadas técnicas de Automação, Integração de Sistemas e Inteligência Artificial.

O Relato de Incidente é o instrumento utilizado para comunicação de problemas no chão-de-fábrica. Ele é realizado pelos operadores do departamento e descreve equipamentos com falhas, problemas de segurança ou de organização. Entretanto, anteriormente, consistia em um processo manual, onde toda a informação estava documentada em papel e passava de mãos em mãos até chegar ao supervisor responsável pela área. Essa situação aumentava a possibilidade de perda de informação, falta de insumos de quais equipamentos mais entram em falha e demora para transmissão da informação.

A automatização desse processo, com a utilização de um software específico para tal função, possibilitou maior engajamento dos operadores. Isso se dá pois, agora, o operador vê seu trabalho valorizado por meio do *feedback* realizado pelo supervisor. Além disso, ao digitalizar os dados, é possível fazer inferências sobre o processo, facilitando ao gestor acompanhar problemas crônicos de segurança e manutenção, além de possibilitar a verificação da causa raiz de certos problemas.

Anteriormente, haviam muitas informações que estavam presentes no SDCD, porém eram faltantes no Sistema Supervisório. Além disso, esse sistema era utilizado de maneira passiva, ou seja, ele não emitia alertas quando os equipamentos da caldeira apresentavam problemas. Isso impossibilitava que o Sistema Supervisório fosse utilizado para auxiliar na identificação de falhas e na prevenção de maiores problemas nos equipamentos. O supervisor da caldeira deveria sempre estar à procura de variáveis não conformes, caso deseja-se encontrar uma avaria nos equipamentos e acessórios da caldeira.

A melhor integração entre o sistema supervisorio e o SDCD, juntamente com a utilização mais ativa desse sistema, proporciona um melhor entendimento dos processos da caldeira, das variáveis que influenciam as demais e dos grandes incidentes que podem surgir a partir de pequenos problemas. Toda essa informação é disponibilizada por meio de alertas e notificações, ou seja, o supervisor não precisa ficar procurando por problemas a todo momento. Ademais, agora, o sistema supervisorio não é mais utilizado apenas como um instrumento para verificar a causa de um problema ocorrido, mas também para prevenir a ocorrência das avarias.

Os alarmes da caldeira estavam, em sua maioria, desconfigurados e não representavam uma condição de distúrbio. Mais de três mil alarmes ocorriam diariamente apenas para o operador da Caldeira de Recuperação. Os alarmes não possuíam uma priorização e suas nomenclaturas não possibilitavam ao operador uma fácil compreensão do problema. Tais falhas, impossibilitavam aos funcionários ter confiança no sistema de alarmes e, por isso, ocasionava a subutilização do sistema.

O sistema de alarmes passou por grandes aprimoramentos, possibilitando uma redução de 61 % no número de incidentes. Entretanto, há um longo caminho a ser percorrido para que se chegue ao idealizado pela ISA 18.2. O trabalho deve ser realizado continuamente, a fim de que se reduza semana a semana a quantidade de ocorrências. Além disso, para que o sistema seja utilizado, é necessário uma mudança cultural. Os operadores devem verificar que o sistema está apresentando uma melhor confiabilidade e começar a agir mais proativamente frente à ocorrência de alarme. Dessa maneira, muitos problemas podem ser minimizados pela rápida correção de suas causas.

A técnica de predição dos alarmes proposta mostrou, de maneira geral, bons resultados, com taxas de acertos superiores a 70 %. Concluímos que uma rede de *Perceptron* Multicamada é um bom método de classificação para o problema apresentado e que os resultados apresentados por ela podem ser utilizados para análise de distúrbios reais na caldeira. Isto aponta que a Inteligência Artificial pode ser uma boa ferramenta aos supervisores e gestores de fábricas para tomada de decisões. Entretanto, para alguns alarmes e dado a diversidade de equipamentos presentes na caldeira, o método MLP não foi capaz de fazer boas predições. Portanto, é necessária uma análise mais aprofundada sobre qual o melhor método para predição de cada alarme.

Em relação a trabalhos futuros, sugere-se aprimorar os estudos sobre a integração dos sistemas aqui propostos. Além disso, verificar a existência de outros gargalos no sistema de segurança da caldeira e, posteriormente, extingui-los, pode aumentar significativamente a confiabilidade da caldeira. Especificamente, para o sistema de relatos de incidente, pode ser trabalhada a integração direta entre o sistema EAM com os Relatos de Incidentes, de modo que não seja necessária a interface humana entre esses dois sistemas. É possível também que, dessa maneira, aumente-se a quantidade de insumos referente aos equipamentos da

fábrica e sejam dadas ao Departamento de Manutenção mais informações sobre os gargalos no seu processo.

O sistema supervisorio das malhas de controle da caldeira poderá apresentar, futuramente, a relação entre cada uma delas e como um problema em um controlador específico pode afetar a operação geral da caldeira. Isto porque, no momento, uma pessoa pouco familiarizada com o processo pode ter dificuldade em assimilar quais malhas de controle possuem maior importância na Caldeira. Já o sistema de alarmes precisa de muitas melhorias para se tornar robusto. O estudo de uma maneira para automatização do processo de análise dos *setpoints* de disparo de cada alarme pode ser realizado. Assim, é possível reduzir o tempo destinado à análise dos mais de 800 alarmes presentes na caldeira. Um sistema que verifique, em tempo real, o comportamento do operador frente ao alarme pode ser importante nesse processo de mudança de cultura, em que o sistema de alarmes pode ter uma maior participação no aumento de segurança e redução de acidentes.

Por fim, para a predição de alarmes, poderá ser coletadas mais variáveis referentes à caldeira. Essas variáveis, podem ser separadas em conjuntos referentes a cada tipo de alarme distinto. Tal trabalho futuro poderá aumentar a qualidade das predições por meio da afinidade entre as variáveis disponíveis e os alarmes preditos. Ademais, podem ser utilizados outros métodos de classificação em conjunto com o *Perceptron* Multicamadas que classifiquem de melhor maneira cada alarme em específico, de modo a criar um sistema com diversos módulos e metodologias.



# Referências

- 1 CORREIA, F. M. *Análise de distúrbios de compactação de cavacos de eucalipto em digestores contínuos fase vapor*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Viçosa, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 38.
- 2 LEITE, N. R.; MILITÃO, R. de A. *Tipos e Aplicações de Caldeiras*. [S.l.], 2008. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 40.
- 3 SILVA, M. P. da. *Inspeção das zonas de pressão de uma caldeira aquatubular*. [S.l.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 41.
- 4 FERREIRA, D. J. de O. *Modelagem de Caldeira de Recuperação Química Kraft*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 27 e 43.
- 5 ROMANO, M. *Guia Definitivo: Tudo o que você precisa saber sobre a EEMUA 191*. 2017. Acessado em: 19/04/2019. Disponível em: <<https://www.logiquesistemas.com.br/blog/eemua-191/>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 47 e 49.
- 6 CONTRERAS, I. S. *Gerenciamento de Alarmes em Plantas Industriais*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 15, 56 e 57.
- 7 PAIT, F. Regressão, classificação, e aprendizado de máquina. *Estadão*, jun. 2018. Acessado em 21/06/2019. Disponível em: <<https://cultura.estadao.com.br/blogs/estado-da-arte/regressao-classificacao-e-aprendizado-por-maquina/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 58.
- 8 IYODA, E. M. *Inteligência Computacional no Projeto Automático de Redes Neurais Híbridas e Redes Neurofuzzy Heterogêneas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, jan. 2000. Citado 3 vezes nas páginas 15, 59 e 60.
- 9 INVENSYS, F. *I/A Series® Documentation K0173WT-S*. R. [S.l.], 2004. Citado 3 vezes nas páginas 15, 62 e 65.
- 10 ALVES, E. D. et al. Estudo do processo de obtenção celulose kraft com ênfase no forno de cal. *Revista Liberato*, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 27, 36, 37 e 38.
- 11 PINHEIRO, O. S. *Modelagem e Otimização do Rendimento de uma Caldeira de Recuperação em uma Indústria de Celulose Kraft*. Dissertação (Mestrado) — Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 2011. Citado na página 28.
- 12 SILVA, W. L. et al. Reduction efficiency prediction of CENIBRA's recovery boiler by direct minimization of gibbs free energy. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, sciELO, v. 25, p. 603 – 611, 09 2008. ISSN 0104-6632. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-66322008000300017&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322008000300017&nrm=iso)>. Citado na página 28.
- 13 BREWSTER, J. Economic impact of modern kraft recovery boilers. In: *International Chemical Recovery Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 9–14. Citado na página 29.

- 14 THE ENGINEERING EQUIPMENT AND MATERIALS USERS ASSOCIATION. *Alarm systems: a guide to design, management and procurement*. 2013. Citado 6 vezes nas páginas 30, 47, 48, 49, 54 e 91.
- 15 ÁRVORES, I. B. de. *Cenários IBA 2018*. 2018. Citado na página 35.
- 16 ÁRVORES, I. B. de. *Revista da Indústria Brasileira de Árvores 2014*. 2014. Citado na página 35.
- 17 KLEPPE, P. J. Kraft pulping. *Tappi*, v. 53, n. 1, jan. 1970. Citado na página 37.
- 18 GOVERNO FEDERAL DO BRASIL. *NR-13 Caldeira, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento*. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2019/02/NR-13-Redaç~ao-dada-pela-Portaria-MTb-n.&ordm-1.082-de-18-de-dezembro-de-2018.pdf>>. Citado na página 39.
- 19 ALBERICH, M. *Estudo das instalações e operações de caldeira de uma indústria de produtos químicos do estado do Paraná, sob ótica da NR-13 e NR-28*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica do Paraná, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- 20 ALTAFINI, C. R. *Curso de Engenharia Mecânica, Disciplina de Máquinas Térmicas, Apostila sobre Caldeiras*. 2002. Disponível em: <<https://fluidcontrols.com.br/wp-content/uploads/2019/05/2-Apostilas-sobre-Caldeiras-Prof&ordm-Carlos-Alberto-Altafini.pdf>>. Citado na página 40.
- 21 CAMPOS, M. A. de. *Estudo das instalações e operação de caldeira e vasos de pressão de uma instituição hospitalar, sob análise da NR 13*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Extremo Sul Catarinense, jun. 2011. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/825/1/MárciaAparecidadeCampos.pdf>>. Citado na página 42.
- 22 AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *Management of Alarm Systems for the Process Industries*. 2009. Citado na página 48.
- 23 ARAUJO, E. V. *Gerenciamento de alarmes em plantas industriais: conceitos, normas e estudo de caso de um forno de reaquecimento de blocos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, dez. 2010. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-8GQFV7/dissertacao\\_mestrado\\_estevao.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-8GQFV7/dissertacao_mestrado_estevao.pdf?sequence=1)>. Citado na página 53.
- 24 ARAUJO, J. R. S. de. *Métricas de Desempenho para Sistema de Alarmes de Processos Industriais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, jul. 2011. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15384/1/JulianoRSA\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15384/1/JulianoRSA_DISSERT.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- 25 SOUZA, G. C. *Sistema de Diagnóstico e Predição de Falhas em Aero geradores Baseado em Algoritmos de Aprendizado de Máquina*. [S.l.], 2018. Citado na página 57.
- 26 BRAUNSTEIN, S. H. et al. Sistema de predição de alarmes em processos industriais por classificação não-supervisionada. *Vetor*, v. 19, n. 1, p. 37–48, 2009. Citado na página 57.

- 27 COELHO, J. et al. Sistema iterativo para diagnóstico de falhas em equipamentos mediante redes bayesianas. *CITENEL*, p. 108–116, 2007. Citado na página 57.
- 28 PALHARES, P. H. da S. et al. Rede bayesiana para suporte à decisão no processo de manutenção preventiva de transformadores de distribuição de energia. In: *X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. [S.l.: s.n.], 2011. X, p. 533–538. Citado na página 57.
- 29 LISEHROODI, M. M.; MUDA, Z.; YASSIN, W. A hybrid framework based on neural network mlp e k-means clustering for intrusion detection system. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computing and Informatics*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 305–311. Citado na página 58.
- 30 SHAH, H.; GHAZALI, R.; NAWI, N. M. Using artificial bee colony algorithm for mlp training on earthquake time series data prediction. *CoRR*, 2011. Citado na página 58.
- 31 CHAPMAN, P. et al. *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*. [S.l.]: SPSS, 2000. Citado na página 58.
- 32 HAYKIN, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 9. ed. [S.l.]: Pearson Education, Inc, 2005. ISBN 81-7808-300-0. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- 33 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. *RESOLUÇÃO No 436, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2011*. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>. Citado na página 95.
- 34 BARELLA, V. H. *Técnicas para o problema de dados desbalanceados e classificação hierárquica*. Dissertação (Mestrado) — USP - São Carlos, set. 2015. Citado na página 100.



# Apêndices



# APÊNDICE A – Causas e Perigos no Departamento de Recuperação e Utilidades

Tabela 9 – Causas de incidentes no DRU

<b>Código</b>	<b>Causa</b>
1001	Operação de Equipamento sem autorização
1002	Não sinalização ou advertência
1003	Falha ao bloquear ou resguardar
1004	Operação em velocidade inadequada
1005	Tornaram os dispositivos de segurança ou equipamentos de controle inoperáveis.
1006	Removido os dispositivos de segurança
1007	Falta ocasionada por ação externa
1008	Utilizado equipamentos de maneira incorreta.
1009	Não utilização adequada do EPI
1010	Carregamento ou transporte de maneira incorreta
1011	Armazenamento de maneira incorreta
1012	Levantamento de objetos de forma incorreta
1013	Adoção de uma posição inadequada para o trabalho
1014	Realização de manutenção de equipamentos em operação
1015	Utilização de equipamento defeituoso ou sem calibração
1016	Trabalho sob a influência de álcool e/ou outras drogas
1017	Não cumprimento das normas de segurança e Meio Ambiente
1018	Improvisação na execução dos trabalhos
1019	Falta de uso de óculos de segurança
1020	Falta de uso de luvas de proteção
1021	Falta de uso de protetor auricular
1022	Falta de uso de botina de segurança
1023	Falta de treinamento ou orientação
1024	Exposição inconsciente momentânea ao risco
1025	Aplicação incorreta de procedimento
1026	Comunicação inadequada e/ou insuficiente
1027	Manuseio inadequado de máquinas ou produtos
1028	Excesso de jornada de trabalho

Tabela 9 (Continuação) - Causas de incidentes no DRU

<b>Código</b>	<b>Causa</b>
1029	Falta de uso de outros EPIs
1030	Falta de conscientização
1041	Planejamento ou análise de dados inadequado
2001	Proteções, barreiras ou contenções inadequadas
2002	Ambiente de trabalho inadequado
2003	Perigos de explosão e incêndio
2004	Ordem e limpeza deficientes, desordem
2005	Condições ambientais perigosas: gases, poeira, fumaça e vapores
2006	Exposição a ruídos
2007	Exposição a radiação
2008	Exposição a temperaturas extremas
2009	Iluminação excessiva ou inadequada
2010	Ventilação inadequada
2011	Escadas mal projetadas
2012	Plataformas mal projetadas
2013	Superfície de trabalho irregular e/ou escorregadia
2014	Instalação elétrica mal executada
2015	Piso irregular ou escorregadio
2016	Linhas de vapor sem proteção
2017	Vazamento de vapor
2018	Vazamento de ar comprimido
2019	Vazamento de líquidos
2020	Fenômenos naturais
2031	Ferramentas, equipamentos ou materiais defeituosos
2032	Sistemas de advertência inadequados
2033	Procedimento inadequado
2034	Falta de procedimento
2051	Equipamento de proteção ou controle inadequados ou insuficientes
2052	Manutenção inadequada de máquinas e equipamentos
2053	Defeito de impressão
2054	Indisponibilidade de máquina
2055	Desgaste de equipamento
2071	Funcionário não qualificado
2091	Material fora de especificação
2092	Falta de material e/ou matéria prima

Tabela 10 – Perigos ocasionados por incidentes em área

<b>Código</b>	<b>Perigo</b>
s11.01	Exposição de partículas e/ou poeiras.
s11.03	Projeção de respingos de produtos químicos.
s11.04	Manuseio e /ou contato com produtos químicos corrosivos e/ou tóxicos e/ou cáusticos.
s11.06	Exposição a gases tóxicos (H <sub>2</sub> S, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> ).
s11.13	Exposição e/ou contato com agentes inflamáveis/combustível (diesel, combustível, tinta, lubrificante, terebentina, verniz...).
s11.14	Exposição e/ou contato com substâncias químicas analíticas.
s11.15	Deficiência ou ausência de oxigênio.
s21.01	Trabalho em local úmido, lamacento ou encharcado.
s21.02	Exposição ao calor em local fechado.
s21.04	Exposição a radiação ionizante.
s21.09	Exposição à ruído.
s41.01	Levantamento excessivo ou inadequado de peso.
s41.03	Posicionamento incorreto.
s41.04	Postura incorreta.
s41.05	Equipamento ou mobiliário inadequado em posto de trabalho.
s41.07	Iluminação natural ou artificial inadequada ou deficiente.
s51.01	Queda e/ou projeção de objetos, peças e/ou partes destas e/ou partículas (não químicos).
s51.02	Contato com superfícies quentes.
s51.03	Contato com energia elétrica.
s51.04	Manuseio ou contato com material ou objeto escoriantes, abrasivos, cortantes ou perfurantes.
s51.05	Explosão.
s51.06	Trabalho em local com diferença de nível igual e/ou superior a 2 metros.
s51.07	Contato com líquidos ou fluídos quentes/vapor.
s51.08	Superfícies e/ou escada, rampa, corredor, passagem escorregadia, deficientes, irregular ou plana com desatenção.
s51.09	Movimentação de cargas suspensas (pontes-rolantes, elevadores, talhas, empilhadeiras, munck, guindastes).
s51.10	Movimentação de veículos e/ou máquinas.
s51.11	Local de trabalho com acesso difícil (congestionado).
s51.12	Dispositivos de partida, acionamento e parada de máquinas e equipamentos inadequados.
s51.15	Contato com partes móveis de máquinas e equipamentos.

Tabela 10 (Continuação) - Perigos ocasionados por incidentes em área

---

<b>Código</b>	<b>Perigo</b>
s51.16	Incêndio.
s51.17	Contato com energia estática.
s51.18	Contato com animal peçonhento ou inseto.
s51.19	Armazenamento de Produtos e/ou materiais incompatíveis e/ou em desordem.
s51.20	Uso de água para consumo.

---

## APÊNDICE B – Alarmes historiados e utilizados no projeto

Tabela 11 – Alarmes selecionados para o projeto

Equipamento	Alarme	Código
Turbina BBA Água de Alimentação CR3	VAZAO AGUA ALIMENTCALDEIRA	101
	O2 DISSOLVIDO AGUA ALIM.	102
	TEMP. AGUA ALIMENTCALDEIRA	103
	PH AGUA ALIMENT. CALDEIRA	104
	PRESSAO DIF. AGUA DE ALIMENTACAO	105
	PRESSAO DESCARGA TURBOBOMBA	106
	VELOC.TURBOBOMBA AGUA ALIMENT.	107
Tq. de Dissolução CR3	NIVEL_NOVO TQ DISSOLUCAO	201
	NIVEL TQ. DISSOLUCAO	202
	NIVEL DO TANQUE DE DISSOLUCAO	203
	DENSIDADE LICOR TQ DISSOLUCAO	204
Vent. Induzido CR3 Lado Norte	INDUZIDO NORTE IN 654	301
	VELOCIDADE VENTIL.INDUZIDO NORTE	302
	VELOC. VENTIL. INDUZIDO DIR.	303
Vent. Ar Primário CR3	O2 GAS COMB. CHAMINE	401
	AR PRIMARIO DO AQUEC. AR	402
	TRS GAS COMB. CHAMINE	403
	VAZAO DE AR MINIMAA.P. + A.S.	404
	VAZAO AR PRIMARIO	405
	GAS COMB. DA CHAMINE	406
	SO2 GAS COMB. CHAMINE	407
Geral	VAZAO DE VAPOR PRINCIPAL	501



# APÊNDICE C – Variáveis do Sistema Supervisório utilizadas para a predição dos alarmes

Tabela 12 – Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

Variável	UOM
PRESSAO DE TIRAGEM DA FORNALHA (TAG SDCD: PIC67026)	mmH2O
PRESSAO DE TIRAGEM DA FORNALHA (TAG SDCD: PIC67026)	
PRESSAO FORNALHA TIRAGEM A (TAG SDCD: PT67026)	mmH2O
PRESSAO FORNALHA TIRAGEM B (TAG SDCD: PT67027)	mmH2O
PRESSAO FORNALHA TIRAGEM C (TAG SDCD: PT67028)	mmH2O
POSICAO SONDA TEMPERATURA (TAG SDCD: ZT67017)	%
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL SUPERAQUECEDOR (TAG SDCD: PDT67004)	mmH2O
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL BANCO TUBOS (TAG SDCD: PDT67005)	mmH2O
GAS COMBUSTIVEL ANTES BANCO TUBOS (TAG SDCD: TT67018)	°C
GAS COMBUSTIVEL DEPOIS BANCO TUBOS (TAG SDCD: TT67019)	°C
GAS COMBUSTIVEL DO ECONOMIZADOR I (TAG SDCD: TT67020)	°C
GAS COMBUSTIVEL DO ECONOMIZADOR II (TAG SDCD: TT67021)	°C
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL ECONOMIZADOR II (TAG SDCD: PDT67006)	mmH2O
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL ECONOMIZADOR I (TAG SDCD: PDT67007)	mmH2O

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

<b>Variável</b>	<b>UOM</b>
O2 GAS COMBUSTIVEL BANCO TUBOS ESQUERDO (TAG SDCD: AT67010)	%
O2 GAS COMBUSTIVEL BANCO TUBOS DIREITA (TAG SDCD: AT67009)	%
SOLIDOS GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AI67015)	mg/Nm <sup>3</sup>
TRS GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AI67011)	ppm
SO2 GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AI67014)	ppm
ENTRADA PRECIPITADOR SUL (TAG SDCD: PT67031)	mmH2O
SAIDA PRECIPITADOR SUL (TAG SDCD: PT67032)	mmH2O
ENTRADA PRECIPITADOR DIREITA (TAG SDCD: PT67029)	mmH2O
SAIDA PRECIPITADOR NORTE (TAG SDCD: PT67030)	mmH2O
CORRENTE VENTILADOR INDUZIDO ESQUERDO (TAG SDCD: IT67005)	%
CORRENTE MOTOR VENTILADOR INDUZIDO DIREITO (TAG SDCD: IT67004)	%
VELOCIDADE VENTILADOR INDUZIDO DIREITO (TAG SDCD: ST67001)	%
VELOCIDADE VENTILADOR INDUZIDO ESQUERDO (TAG SDCD: ST67002)	%
GAS COMBUSTIVEL DA CHAMINE (TAG SDCD: TT67022)	°C
CO GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67013)	ppm
SO2 GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67014)	ppm
O2 GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67012)	%
TRS GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67011)	ppm

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

<b>Variável</b>	<b>UOM</b>
SOLIDOS GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67015)	<i>mg/Nm<sup>3</sup></i>
PRESSAO AR DE INSTRUMENTOS (TAG SDCD: PT67038)	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>
PRESSAO BALAO LADOESQUERDO (TAG SDCD: PT67015)	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>
NIVEL I BALAO ESQUERDA (TAG SDCD: LI67002B)	mmH <sub>2</sub> O
NIVEL BALAO SINAL P/ TRASAR (TAG SDCD: LI67002OUT)	mmH <sub>2</sub> O
VAZAO AGUA ALIMENTACAO CALDEIRA (TAG SDCD: FIC67001)	
Entrada do controlador de vazao de agua de alimentacao da caldeira ( TAGSDCD: 67DL:FIC67001.MEAS )	Kg/h
VAZAO AGUA ALIMENTACAO CALDEIRA (TAG SDCD: FIC67001)	kg/h
PRESSAO AGUA ALIMENTACAO CR3 PARA ECONOMIZADOR (TAG SDCD: PT67012)	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>
TEMPERATURA AGUA ALIMENTACAO CALDEIRA (TAG SDCD: TT67003)	°C
VAZAO DE VAPOR PRINCIPAL (TAG SDCD: FT67013)	kg/h
VAZAO DE VAPOR PRINCIPAL (TAG SDCD: FT67013)	kg/h
PRESSAO VAPOR APOS SUPERAQUECIDO (TAG SDCD: PT67017)	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>
TEMPERATURA VAPOR PRINCIPAL (TAG SDCD: TT67009) _	°C
VAPOR ANTES SUPERAQUECEDOR 3 DIREITO (TAG SDCD: TT67032)	°C
TEMPERATURAVAPOR ENTRANDO SUPERAQUECEDOR #3 (TAG SDCD: TIC67031)	
TEMPERATURAVAPOR ENTRANDO SUPERAQUECEDOR #3 (TAG SDCD: TIC67031)	°C
VAPOR ANTES SUPERAQUECEDOR 2 DIREITO (TAG SDCD: TT67030)	°C

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

Variável	UOM
TEMPERATURAVAPOR ENTRANDO SUPERAQUECEDOR #2 (TAG SDCD: TIC67029)	
TEMPERATURAVAPOR ENTRANDO SUPERAQUECEDOR #2 (TAG SDCD: TIC67029)	°C
TEMPERATURAVAPOR SAINDO SUPERAQUECEDOR #1 (TAG SDCD: TT67008)	°C
VAZAO AGUA DESMI P/ DESAERADOR (TAG SDCD: FT67007)	kg/h
CONDENSADO PLANTA P/ DESAREADOR (TAG SDCD: FT67009)	kg/h
VAPOR 2KG P/ DESAERADOR (TAG SDCD: FT67010)	kg/h
PRESSAO DESAERADOR (TAG SDCD: PT67039)	kgf/cm <sup>2</sup>
NIVEL TANQUE ESTOCAGEMDO DESAERADOR (TAG SDCD: LT67016)	%
VAZAO VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: FT67014)	kg/h
VAPOR PARA SOPRADORES GRUPO 1 (TAG SDCD:PT67040)	KG/H
VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: TT67010)	°C
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL SUPERAQUECEDOR (TAG SDCD: PDT67004)	mmH2O
O2 GAS COMBUSTIVEL BANCO TUBOS DIREITA (TAG SDCD: AT67009)	%
O2 GAS COMBUSTIVEL BANCO TUBOS ESQUERDO (TAG SDCD: AT67010)	%
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL ECONOMIZADOR II (TAG SDCD: PDT67006)	mmH2O
PRESSAO DIFERENCIAL GAS COMBUSTIVEL ECONOMIZADOR I (TAG SDCD: PDT67007)	mmH2O
GAS COMBUSTIVEL ANTES BANCO TUBOS (TAG SDCD: TT67018)	°C
GAS COMBUSTIVEL DEPOIS BANCO TUBOS (TAG SDCD: TT67019)	°C
GAS COMBUSTIVEL DO ECONOMIZADOR I (TAG SDCD: TT67020)	°C

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

<b>Variável</b>	<b>UOM</b>
GAS COMBUSTIVEL DO ECONOMIZADOR II (TAG SDCD: TT67021)	°C
NIVEL TANQUE AGUA DESMI 2 (TAG SDCD: LT76001)	%
VAZAO AGUA DESMI P/ TANQUE 1/2 (TAG SDCD: FT72001)	$m^3/h$
CONDUTIVIDADE COLETOR GERAL MAQUINA PAPEL 3 (TAG SDCD: CT72005)	uS/cm
CONDUTIVIDADE AGUA DESMI (TAG SDCD: CIT71012)	uS
VAZAO VAPOR SUPERAQUECIDO (TAG SDCD: FT77300)	t/h
SOLIDOS GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67015)	$mg/Nm^3$
O2 GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67012)	%
CO GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67013)	ppm
SO2 GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67014)	ppm
TRS GAS COMBUSTIVEL CHAMINE (TAG SDCD: AT67011)	ppm
GAS COMBUSTIVEL DA CHAMINE (TAG SDCD: TT67022)	°C
VELOCIDADE VENTILADOR INDUZIDO ESQUERDO (TAG SDCD: ST67002)	%
VELOCIDADE VENTILADOR INDUZIDO DIREITO (TAG SDCD: ST67001)	%
AR P/ QUEIMADORES CARGA (TAG SDCD: FT67004)	$Nm^3/h$
VAZAO AR TERCIARIO (TAG SDCD: FT67005)	$Nm^3/h$
RETORNO OLEO COMBUSTIVEL QUEIMADOR CARGA (TAG SDCD: FT67024)	KG/MIN
DUTO AR TERCIARIO PAREDE TRASEIRA (TAG SDCD: PT67025)	mmH2O
DUTO AR TERCIARIO PAREDE FRENTE (TAG SDCD: PT67024)	mmH2O

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

Variável	UOM
AR SECUNDARIO DO AQUECEDOR AR (TAG SDCD: TT67016)	°C
VAZAO AR SECUNDARIO (TAG SDCD: FT67006)	Nm <sup>3</sup> /h
ANEL AR SECUNDARIO ESQUERDA (TAG SDCD: PT67022)	mmH2O
ANEL AR SECUNDARIO DIREITA (TAG SDCD: PT67023)	mmH2O
VAZAO AR PRIMARIO (TAG SDCD: FT67002)	Nm <sup>3</sup> /h
PRESSAO ANEL AR PRIMARIO ESQUERDO (TAG SDCD: PT67020)	mmH2O
PRESSAO ANEL AR PRIMARIO DIREITO (TAG SDCD: PT67021)	mmH2O
AR PRIMARIO DO AQUECEDOR AR (TAG SDCD: TT67015)	°C
DENSIDADE DO LICOR TANQUE ESTOCAGEM (TAG SDCD: DIT68003)	% SOLIDS
Nível tanque de estocagem 72 Radar	%
NIVEL TANQUE ESTOCAGEM LICOR 72% (TAG SDCD: LT68027)	%
VAZAO LICOR DESSAPONIFICADO (TAG SDCD: FT61001)	l/min
Nível Lavador de Gases	%
TANQUE MISTURA SABAO/LICOR 72% (TAG SDCD: LT67020)	%
TEMPERATURA TANQUE MISTURA SABAO/LICOR 72% (TAG SDCD: TT67024)	°C
VAZAO LICOR ENTRADA (TAG SDCD: FT67017A)	l/min
VAZAO LICOR PRETO P/ QUEIMA (TAG SDCD: FT67017)	l/min
VAZAO LICOR PRETO TPH (TAG SDCD: FIC67017)	
Vazao de licor preto TPH ( TAGSDCD: 67BL:FIC67017.MEAS )	tph
Saida do controlador de vazao de Licor Preto ( TAGSDCD: 67BL:FIC67017.OUT )	%
VAZAO LICOR PRETO TPH (TAG SDCD: FIC67017)	t/h

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

<b>Variável</b>	<b>UOM</b>
RAZAO DE PRODUCAO CONTROLE CARGA (TAG SDCD: PRCTLR)	
Total de sólidos seco (TSS)	t/n
RAZAO DE PRODUCAO CONTROLE CARGA (TAG SDCD: PRCTLR)	t/dia
PRESSAO LICOR PRETO P/ QUEIMA (TAG SDCD: PT67042)	kgf/cm <sup>2</sup>
TEMPERATURA LICOR PRETO P/ QUEIMADORES (TAG SDCD: TT67034)	°C
ALIVIO VAPOR 11KG (TAG SDCD: PT67904)	kgf/cm <sup>2</sup>
MEDIDOR I DENSIDADE LICOR PRETO (TAG SDCD: DIT67341)	%
MEDIDOR II DENSIDADE LICOR PRETO (TAG SDCD: DIT67342)	%
VAPOR REDUTORA 42/11 KG/CM2 (TAG SDCD: TT67902)	°C
VAPOR REDUTORA 11/2 KG/CM (TAG SDCD: PT67905)	kgf/cm <sup>2</sup>
TEMPERATURA VAPOR REDUTORA 11/2 KG/CM (TAG SDCD: TT67903)	°C
DENSIDADE LICOR TANQUE DISSOLUCAO (TAG SDCD: DT67051)	SPGR
LICOR VERDE/AGUA LAVADO DE/PARA TANQUE DISSOLUCAO (TAG SDCD: FI67018)	l/min
LICOR VERDE/AGUA LAVADO DE/PARA TANQUE DISSOLUCAO (TAG SDCD: FI67019)	l/min
VAZAO LICOR BRANCO P/ CELULOSE (TAG SDCD: FT63001)	l/min
VAZAO VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: FT67014)	kg/h
VAPOR PARA SOPRADORES GRUPO 2 (TAG SDCD: FT67047)	KG/H
VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: PCV67040)	%
VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: PIC67040)	

Tabela 12 (Continuação) - Variáveis utilizadas para predição dos alarmes

<b>Variável</b>	<b>UOM</b>
VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: PIC67040)	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>
VAPOR PARA SOPRADORES GRUPO 2 (TAG SDCD:PIC67047)	%
VAPOR PARA SOPRADORES GRUPO 2 (TAG SDCD:PIC67047)	KG/CM2
VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: PT67019)	<i>kgf/cm<sup>2</sup></i>
VAPOR PARA SOPRADORES GRUPO 1 (TAG SDCD:PT67040)	KG/H
VAPOR PARA SOPRADORES GRUPO 2 (TAG SDCD:PT67047)	KG/CM2
VAPOR PARA SOPRADORES (TAG SDCD: TT67010)	°C
CONDENSADO SOPRADORES SUPERAQUECEDOR (TAG SDCD: TT67011)	°C
CONDENSADO SOPRADORES ECONOMIZADOR & BANCO (TAG SDCD: TT67012)	°C
VELOCIDADE SOPRADORES (TAG SDCD: VFD67010)	%
Vazão Ar Terciário Superior	<i>nm<sup>3</sup>/h</i>
Corrente Motor Ventilador Ar terciário Superior	AMPS
Pressão Ar Terciário Superior	mmH2O
Rotação Motor Ventilador Ar terciário Superior	RPM