

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE  
TECNOLOGIAS**

**MARCOS AURÉLIO FABRÍCIO**

**MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS  
ELÉTRICOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO IOT**

**CAMPINAS**

**2018**

**MARCOS AURÉLIO FABRÍCIO**

**MONITORAMENTO DE EQUIPAMENTOS  
ELÉTRICOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO IOT**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Frank Herman  
Behrens

Coorientador: Prof. Dr. David Bianchini

Ficha Catalográfica Elaborada por Marluce Barbosa  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI – PUC-Campinas

t621.3851 F126m Fabrício, Marcos Aurélio.  
Monitoramento de equipamentos elétricos industriais utilizando IOT /  
Marcos Aurélio Fabrício. - Campinas: PUC-Campinas, 2018.  
71 f.

Orientador: Frank Herman Behrens.

Coorientador: David Bianchini.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Inclui bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Máquinas na indústria. 3. Máquinas - Monitoração. 4. Detecção de sinais. 5. Engenharia elétrica. I. Behrens, Frank Herman. II. Bianchini, David. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações. IV. Título.

CDD 22.ed. – t621.3851


**MARCOS AURÉLIO FABRÍCIO**

**MONITORAMENTOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS  
INDUSTRIAIS UTILIZANDO IOT**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Dr. Frank Herman Behrens

Dissertação defendida e aprovada em 08 de fevereiro de 2018 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Frank Herman Behrens  
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Indayara Bertoldi Martins  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Pedro Carvalhães Dias  
UTFPR Campus Cornélio Procópio

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Frank Herman Behrens,

Orientador e por todo conhecimento, empenho e motivação que contagia, por dedicar parte de seu tempo em uma viagem à cidade de Limeira e conhecer o local de testes deste trabalho. Pelo excelente trabalho em conjunto que ele me proporcionou com os alunos de iniciação e por ter se tornado além de um orientador, um amigo.

Ao Prof. Dr. David Bianchini,

Coorientador, por acreditar em mim e me aprovar na entrevista para iniciar as atividades de Mestrado e por ser meu coorientador.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho,

Pelo meu aprendizado em redes de telecomunicações, pela sua espontaneidade e dedicação em ensinar e compartilhar sua experiência no domínio de protocolos de comunicação e comunicação via rádio.

Aos Companheiros de classe, Gustavo, Mateus, Ricardo e Thiago,

Pelo excelente trabalho em equipe, sempre me motivando e auxiliando, para que nosso trabalho tenha excelência em seus resultados.

Ao Graduando em Engenharia de Computação Robson Quero,

Por seu entusiasmo e dedicação na elaboração de softwares de armazenamento e tratamento de dados.

Ao Sr. Fábio Rosa,

Gestor da Plataforma Tago, pelo seu apoio, atenção e investimento nos alunos com acesso à plataforma inovadora para a Internet das Coisas Industriais.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única esperança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”  
(Henry Ford)

# RESUMO

Fabrcio, Marcos Aurlio. Monitoramento de Equipamentos Eltricos Industriais Utilizando IoT. 2018. 73f. Dissertao (Mestrado em Gesto de Redes de Telecomunicaes) – Programa de Ps-Graduao em Engenharia Eltrica, Pontifcia Universidade Catlica de Campinas, Campinas, 2018.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um sistema de monitoramento de equipamentos eltricos de uma linha de produao, visando o acompanhamento em tempo real do estado de operao das mquinas monitoradas, permitindo a realizao da gesto de operao desses equipamentos e a deteco antecipada de desvios operacionais e de falhas. O sistema desenvolvido realiza a mediao da corrente eltrica eficaz consumida pelos equipamentos monitorados, utilizando uma rede de sensores conectados a um mdulo concentrador de dados, que por sua vez realiza o armazenamento intermedirio, o tratamento preliminar dos dados e o posterior envio a uma plataforma de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT). O tratamento preliminar de dados visa a anlise da srie temporal dos valores das correntes eltricas com o fim de obter uma avaliao inicial do estado de operao da mquina monitorada. Em seguida, essas informaes pr-processadas so enviadas via internet a uma plataforma de IoT com o objetivo de armazenamento a longo prazo, ps-processamento e visualizao em tempo real dos dados pelos usurios de interesse. Na plataforma de IoT, os dados so formatados para exibio e avaliao dos usurios considerando formatos grficos compreensveis, sendo possvel a emisso de alertas e de relatrios ao serem detectados desvios em relao aos parmetros operacionais normais. Ao ser detectado um desvio de comportamento no consumo de corrente, correlacionando a algum tipo de falha em potencial, o sistema sinaliza informaes adicionais a um usurio de interesse (ao supervisor da linha de produao, por exemplo), que de forma planejada, procede a alguma intervenao no equipamento, sem prejuzo da produao. A disponibilidade da srie temporal completa dos dados armazenados bem como o histrico de ocorrncias registrados ao longo do uso do sistema de monitoramento permite ainda a busca de correlaes entre dados de outras origens e naturezas, e a interpretao dos mesmos dados sob outras pticas em contextos alm da operao ou manuteno da mquina. O sistema de monitoramento proposto permite prover um mnimo de automao em mquinas antigas e abre a possibilidade de monitoramento independente, paralela e no intrusiva em mquinas que j contam com um sistema supervisrio moderno. Uma indstria que atinja o objetivo de tornar o conjunto de seus equipamentos produtivos totalmente monitorado se credencia para dar o prximo passo rumo a Indstria 4.0.

Palavras-chave: Monitoramento de mquinas industriais; Internet das Coisas; Rede de Sensores Sem Fio; Anlise de Assinatura de Corrente; Indstria 4.0.

# ABSTRACT

Fabrcio, Marcos Aurlio. *Monitoring of Industrial Electrical Equipment using IoT*. 2018. 72f. Dissertation (Master in Telecommunication Network Management) – Programa de P3s-Gradua33o em Engenharia El3trica, Pontifrcia Universidade Cat3lica de Campinas, Campinas, 2018.

*The objective of this work is to monitor the electrical equipment of a production line, aiming at monitoring in real time the state of the operation of the monitored machines, allowing the accomplishment of equipment management and early detection of operational deviations and faults. The developed system performs the measurement of the effective electric current through monitored equipment, use a network of sensors connected to a data concentrator module, which in turn performs the intermediate storage, the preliminary treatment of the data and the subsequent send an Internet platform of Things (Internet of Things - IoT). The preliminary treatment of data for analysis of the time series of values of electric currents to obtain an initial evaluation of the state of operation of the monitored machine. Then, the pre-processed information is sent via the internet, a usage platform for term storage, post-processing and real-time visualization of the data by users of interest. In the data platform, the data is formatted for visualization and evaluation of the users, allowing the presentation of alerts and knowledge when deviations are detected in relation to the normal operational parameters. When a current consumption behavior deviation is detected, correlating a potential failure type, the system signals additional information to a User's interest group (to the supervisor of the production line, for example), which in a planned manner, proceeds to some intervention without equipment, without prejudice of the production. The availability of the full-time series of stored data as well as the history of occurrences recorded throughout the use of the monitoring system but is still looking for correlations between data of other origins and nature, and the interpretation of the same data under other perspectives beyond the operation or maintenance of the machine. The monitoring system proposed in this work allows to provide a minimum of automation in old machines and opens the possibility of independent, parallel and non-intrusive monitoring in machines that already have a modern supervisory system. An industry that achieves the goal of making all its production equipment fully monitored is credited to take the next step towards Industry 4.0.*

*Keywords: Predictive Maintenance; Internet of Things; Wireless Sensor Network; Current Signature Analysis; Industry 4.0.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação falha – defeito.....	15
Figura 2 – Áreas de aplicação e usuários de IoT.....	22
Figura 3 – Plataforma de IoT.....	23
Figura 4 – Componentes de uma RSSF. ....	24
Figura 5 – Componentes de frequência de banda lateral devido a rolamentos danificados. .....	25
Figura 6 – Os quatro estágios da Revolução Industrial .....	26
Figura 7 – Internet das coisas na Indústria .....	28
Figura 8 – Layout da linha MSG sob estudo.....	31
Figura 9 – Equipamento típico da linha MSG. ....	32
Figura 10 – Medida preliminar de consumo de corrente com amperímetro manual. ....	34
Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento. ....	35
Figura 12 – Arduino Uno R3.....	36
Figura 13 – Sensor de corrente SCT013.....	37
Figura 14 – Circuito sensor de corrente SCT013.....	37
Figura 15 – Montagem experimental para medidas de corrente trifásicas. ....	40
Figura 16 – Detalhe do circuito eletrônico desenvolvido. ....	40
Figura 17 – Medidas preliminares de corrente. ....	41
Figura 18 – Lado OP50 da estação OP50-60 da linha MSG com sua IHM. ....	43
Figura 19 – Lado OP60 da estação OP50-60 da linha MSG. ....	43
Figura 20 – Inserção do equipamento de monitoração de corrente no painel elétrico. ....	44
Figura 21 – Vista frontal do painel elétrico da estação de trabalho OP50-60. ....	45
Figura 22 – Monitoramento do consumo de corrente durante vinte dias consecutivos. ....	46
Figura 23 – Monitoramento do consumo de corrente durante uma semana.....	47
Figura 24 – Consumo de corrente num intervalo de 1 hora de um dia típico.....	48
Figura 25 – Consumo de corrente num intervalo de 5 minutos de um dia típico.....	49
Figura 26 – Consumo de corrente num intervalo de 2 minutos de um dia típico.....	49
Figura 27 – Consumo de corrente registrado na ferramenta Tago.....	50
Figura 28 – Controle produtivo através do comportamento de consumo .....	51
Figura 29 – Trecho de amostras coletadas durante um intervalo de 27 minutos. ....	52
Figura 30 – Trecho de amostras submetidas ao janelamento de <i>Blackman</i> . ....	52
Figura 31 – Espectro de frequências do sinal da Figura 30.....	53
Figura 32 – Detecção de máximos de corrente dentro de uma faixa de normalidade.....	54
Figura 33 – Exemplo de classificação do tipo e estado de operação.....	56
Figura 34 – Painel de controle indicando máquina funcionando em estado normal. ....	57
Figura 35 – Painel de controle indicando máquina parada em estado normal. ....	57
Figura 36 – Painel de controle indicando máquina em emergência, estado normal.....	58
Figura 37 – Painel de controle exibindo informações atuais do equipamento OP50-60 ...	59
Figura 38 – Detalhe do painel de controle .....	60
Figura 39 – <i>Dashboard</i> Painel Elétrico para corrente da fase S. ....	61
Figura 40 – Painel de controle exibindo informações para gestão da produção. ....	61
Figura 41 – Exibição de notificações no <i>browser</i> utilizado para visualização da aplicação. .....	62
Figura 42 – Visualização do painel de controle de monitoramento em um <i>Smartphone</i> . .	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Questões gerais sobre o monitoramento de condições .....	21
Tabela 2 – Caracterização inicial do consumo de corrente(A). .....	33
Tabela 3 – Classificação dos valores de corrente .....	55

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	=	Aplicação;
A/D	=	Analógico/Digital;
AM	=	Amplitude Modulada;
An	=	Atuadores;
BD	=	Banco de dados;
C	=	Concentrador;
CA	=	Corrente Alternada;
CBM	=	Manutenção Baseada na Condição (em inglês, <i>Condition-Based Maintenance</i> );
CM	=	Monitoramento da Condição (em inglês, <i>Condition Monitoring</i> );
CPS	=	Sistema Ciber-Físico (em inglês, <i>Cyber-Physical System</i> );
DFT	=	Transformada Direta de Fourier (em inglês, <i>Discrete Fourier Transform</i> );
FW	=	Firmware;
HTTP	=	Protocolo de Transferência de Hipertexto (em inglês, <i>HyperText Transfer Protocol</i> );
Hz	=	Hertz;
ICs	=	Circuitos Integrados (em inglês, <i>Integrated circuits</i> );
ICM	=	Monitoramento Inteligente de Condição (em inglês, <i>Intelligent Condition Monitoring</i> );
IHM	=	Interface Homem Máquina;
IoT	=	Internet das Coisas (em inglês, <i>Internet of Things</i> );
M	=	Microcontrolador;
MCD	=	Módulo Concentrador de Dados;
MCSA	=	Análise da assinatura de corrente (em inglês, <i>Motor Current Signature Analysis</i> );
MEMS	=	Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos(em inglês, <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> );
MSA	=	Módulo Sensor-Atuador;
MSG	=	Engrenagem de Direção Mecânica (em inglês, <i>Mechanical Steering Gear</i> );
OP	=	Operação;
PHP	=	Hipertexto Pré-processadas (em inglês, <i>Hypertext Preprocessor</i> , originalmente <i>Personal Home Page</i> );
RF	=	Rádio Frequência;

RMS = Valor quadrático médio ou valor eficaz (em inglês, *Root Mean Square*);  
RSSF = Rede de Sensores Sem Fio;  
Sn = Sensores;  
SMS = Serviço de Mensagens Curtas (em inglês, *Short Message Service*);  
SS = Sistema Supervisório;  
SP = São Paulo;  
SQL = Linguagem de Consulta Estruturada (em inglês, *Structured Query Language*);  
SW = Programa (em inglês, *Software*);  
TBM = Manutenção Baseada no Tempo (em inglês, *Time-Based Maintenance*);  
TI = Tecnologia da Informação;  
TIC = Tecnologia da Informação e Comunicação;  
USB = Porta Universal Serial (em inglês, *Universal Serial Bus*).

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Motivação .....	16
1.2	Objetivos.....	16
1.3	Organização do trabalho.....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO .....</b>	<b>18</b>
2.1	Monitoramento de condição.....	18
2.2	Internet das Coisas (IoT).....	21
2.3	Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) .....	24
2.4	Análise de Assinatura de Corrente.....	25
2.5	Indústria 4.0.....	26
<b>3</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>30</b>
3.1	Estudo de Caso .....	30
3.2	Objeto de Estudo .....	32
3.3	Sistema de monitoramento .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO A – Aferição dos sensores SCT 013 .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O termo “monitoramento” é muito utilizado em diferentes contextos, tais como em administração, finanças, engenharia, na área ambiental, etc. No que concerne à engenharia, o monitoramento de equipamentos industriais pode ser definido como uma coleta sistemática de dados e uma análise da informação coletada de como o objeto monitorado opera no contexto de operação fabril (adaptado de Shapiro, 2002 - PORTAL). Significa que as informações são coletadas durante toda a operação e que a análise dessas informações contribui para que os usuários interessados acompanhem os resultados alcançados e verifiquem a necessidade de ajustes nas ações para que os objetivos da operação sejam alcançados.

O monitoramento de condições operacionais de equipamentos industriais tem por objetivos o acompanhamento do processo de produção, a avaliação da “saúde” do equipamento frente as suas especificações técnicas nominais e às condições ótimas de carregamento, e a detecção precoce de processos de deterioração física que causem desvios funcionais ou avaria grave (HAN, 2003).

Falhas em equipamentos elétricos utilizados em linhas de produção ocasionam, quase sempre, interrupção do processo produtivo, com conseqüente impacto econômico e operacional, quer seja pelo tempo despendido na manutenção, ou pela redução do volume produzido. A Figura 1 ilustra o contexto onde falhas aparecem e sua implicação, onde se pode observar que a ocorrência de uma falha física pode acarretar na ocorrência de um erro operacional, que por sua vez pode causar um defeito observável no bem ou serviço produzido, segundo a avaliação do usuário (SAMPAIO, 2016).

Figura 1 – Relação falha – defeito



Fonte: adaptado de SAMPAIO, 2016

A supervisão operacional de um equipamento pode ser feita através da instalação de sensores apropriados, para se medir grandezas diretamente relacionadas à perfeita funcionalidade do mesmo, tais como temperatura, pressão, vibração, alinhamento, ruído sonoro e ultrassônico, e em se tratando de equipamentos elétricos, incluem-se sensores de corrente e tensão elétrica, e ainda fluxo magnético, no caso de motores e transformadores (GOYAL, 2015).

Neste trabalho, um equipamento elétrico de uma linha de produção, escolhida como estudo de caso, será monitorado através do seu consumo de corrente elétrica. Caso ocorra alguma alteração no padrão pré-estabelecido de consumo de corrente, pode-se com isto, planejar, de forma preditiva, alguma intervenção de ajuste ou de manutenção, visando à resolução do desvio a tempo, antes que o equipamento apresente um desvio operacional maior, que cause alguma falha inesperada, que resulte na sua paralisação e, portanto, na interrupção da produção. Como benefício deste método, minimizam-se as paradas na linha de produção e maximiza-se a vida útil dos equipamentos.

A utilização de uma rede de sensores de corrente, associados a uma ou mais máquinas, permite a captura de dados, de forma remota, e seu subsequente processamento num módulo concentrador de dados, com vistas à detecção de anomalias nas formas de onda de corrente dos objetos monitorados e consequente geração de relatórios, alertas e alarmes para os gestores do processo produtivo (MILJKOVIC, 2015).

## 1.1 Motivação

A execução dos serviços de manutenção em máquinas e equipamentos industriais, sempre foram um dos grandes gargalos nos processos produtivos (WYRELSKI, 1997). Estes serviços são originados principalmente nas demandas internas com o objetivo de manter o ritmo de produção, pelo volume e urgência de alguns casos, que fazem com que muitas ocorrências se tornem prioritárias, dificultando a resolução do problema num curto prazo. Devido ao grande volume de demandas de manutenção observadas em plantas industriais, este trabalho visa o desenvolvimento, de uma nova forma de realizar o monitoramento de máquinas no contexto da Internet das Coisas. A perspectiva do desenvolvimento de um sistema de monitoramento, que opere de forma autônoma e automática, e que possibilite a obtenção informações em tempo real a respeito do estado do equipamento, constitui a motivação na elaboração deste trabalho, buscando novas formas para melhoria contínua do processo de aquisição de dados, processamento, predição e sinalização.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de equipamentos elétricos de uma linha de produção, visando o acompanhamento em tempo real do estado de operação das máquinas monitoradas, permitindo a realização da gestão de operação desses equipamentos e a detecção antecipada de desvios operacionais e de falhas.

Como objetivos específicos, este trabalho visa:

- Desenvolver uma técnica não invasiva de coleta de dados digitalizados relativos a correntes eficazes trifásicas aplicáveis a equipamentos industriais.
- Desenvolver um módulo concentrador de dados para armazenamento intermediário, pré-processamento dos dados coletados e envio a plataformas de serviços de IoT.
- Implementar uma aplicação de visualização e gestão dos dados coletados utilizando uma plataforma de serviços de IoT.



- Desenvolver formas de pós-processamento para geração de alertas e relatórios para utilização dos usuários gestores do sistema de monitoramento.

### **1.3 Organização do trabalho**

O Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica na qual este trabalho se baseia, cobrindo os conceitos de Monitoramento de Condição, Internet das Coisas, Redes de Sensores Sem Fio, Análise de Assinatura de Corrente e Indústria 4.0. O Capítulo 3 apresenta o Método utilizado no desenvolvimento do sistema de monitoramento, bem como na escolha do estudo de caso utilizado para validá-lo. No Capítulo 4 são apresentados os resultados da aplicação do sistema de monitoramento ao estudo de caso escolhido. As conclusões deste trabalho são apresentadas no Capítulo 5. Perspectivas de trabalhos futuros decorrentes dos resultados obtidos neste trabalho são tratadas no Capítulo 6.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

A título de fundamentação teórica, a proposta de desenvolvimento de um sistema de monitoramento de equipamentos elétricos de uma linha de produção, tema central do presente trabalho, requereu uma investigação mais apurada sobre alguns temas, tais como Monitoramento de Condição, Internet das Coisas, Rede de Sensores Sem Fio, Análise de Assinatura de Corrente e Indústria 4.0, que serão apresentados a seguir.

O monitoramento de variáveis elétricas de uma máquina se enquadra no contexto de uma aplicação industrial, que modernamente vem sofrendo o impacto da chamada 4ª. Revolução Industrial, denominada de Indústria 4.0, que se beneficia fortemente das tecnologias emergentes da Internet das Coisas, que por sua vez se implementa de forma impactante com a tecnologia das Redes de Sensores Sem Fio. Para fechar esse cenário, a aplicação de técnicas de Análise de Assinatura de Corrente Elétrica dá base à forma como os dados monitorados são pré-processados para se transformar em informação sobre o objeto monitorado.

### 2.1 Monitoramento de condição

O monitoramento de condição, também conhecido como CM – *condition monitoring*, pode ser definido como uma técnica ou um processo de monitoramento das características operacionais de uma máquina de tal forma que alterações de valor ou mudanças de tendência das características monitoradas podem ser usadas para estimar a "saúde" da máquina, ou mesmo prever a necessidade de manutenção antes que ocorra uma deterioração funcional ou avaria grave. (HAN, 2003).

CM é uma técnica que serve de suporte à estratégia de manutenção baseada nas condições (CBM – *condition-based maintenance*), também conhecida como manutenção preditiva. Anteriormente ao advento da CBM, a manutenção baseada no tempo (TBM – *time-based maintenance*) foi a principal estratégia de manutenção utilizada. A TBM é utilizada para examinar e reparar máquinas que devem ser desligadas do processo produtivo de acordo com um

cronograma pré-definido e com pouca informação sobre a condição de operação das máquinas. Desse modo, diversas falhas podem ser encontradas ou prevenidas. No entanto, TBM pode redundar em desligamentos desnecessários e não previne a ocorrência de incidentes inesperados nos intervalos entre paradas consecutivas. Em contraste, a CBM permite obter maior entendimento sobre o estado das máquinas e indica claramente quando e qual tipo de manutenção é necessário para que se possa reduzir o custo de mão-de-obra e garantir que não haja uma parada acidental logo a seguir. A estratégia CBM tem potencial para resultar num ótimo serviço de manutenção através de um sistema CM, capaz de fornecer informações corretas e úteis sobre a real condição da máquina monitorada (PRENNUSHI, 2001).

Um sistema CM deve ser capaz de monitorar o funcionamento de máquinas, prevendo a necessidade de manutenção antes de uma deterioração operacional grave ou da ocorrência de avaria que cause paralisação, identificando e localizando os defeitos em detalhes e até mesmo permitindo a estimativa de vida das máquinas.

Quatro componentes fundamentais devem estar presentes em um sistema CM (HAN, 2003):

- a) Sensoriamento. Um sensor converte uma grandeza física em um sinal elétrico. Grandezas e fenômenos físicos podem ser monitorados de modo que os valores de uma variável ou suas mudanças sejam detectáveis para revelar falhas em estágios iniciais muito antes de se tornarem catastróficas. A escolha dos sensores adequados dependerá do método de monitoramento e do grau de conhecimento sobre os possíveis mecanismos de falha da máquina. Comumente, os sensores devem ser adequados para a medição em tempo real. Sensibilidade adequada, baixo custo e a característica são requisitos chave de sensores para aplicações de CM.
- b) Aquisição de dados. Um módulo de aquisição de dados é necessário para realizar a amplificação, filtragem e pré-processamento dos sinais elétricos analógicos providos pelos sensores, com posterior conversão

análogo-digital. Deve dispor de armazenamento em memória local de dados e alguma forma de comunicação externa, cabeada ou sem fio.

- c) Detecção de falha. O objetivo principal é descobrir se há uma falha em estágio inicial aparecendo na máquina monitorada, para que alguma forma de alarme possa ser dada e a seguir uma análise mais profunda seja realizada. Existem dois métodos para detecção de falhas, o método referenciado por modelo e o método de extração de características. O primeiro detecta falhas comparando os resultados das medidas com as previsões de um modelo, que pode ser de simulação matemática ou baseado em inteligência artificial. Para a maioria dos métodos de extração de características, as tecnologias de processamento de sinal nos domínios do tempo e da frequência são usadas para se obter "assinaturas" que sejam características de um desempenho normal ou defeituoso.
- d) Diagnóstico. Os sinais anormais detectados precisam ser pós-processados de forma a resultar numa prescrição clara para a manutenção. Essa análise costumava ser feita por especialistas humanos e atualmente observa-se uma tendência para implementá-la automaticamente por computador, sem intervenção humana. As prescrições apresentadas ao usuário devem incluir nome da falha, localização, condições operacionais da máquina nas circunstâncias de falha, sugestões de ações de manutenção, dentre outras informações pertinentes.

As tarefas típicas de CM, o processo de implementação e as tecnologias relacionadas estão apresentadas na Tabela 1. Percebe-se que o uso de técnicas avançadas de processamento digital de sinais e as tecnologias de inteligência artificial (*fuzzy logic*, redes neurais) são ferramentas poderosas na análise de dados. Como a existência de funções automáticas de interpretação dos dados e de diagnóstico em tempo real são características consideradas importantes em um sistema CM, o monitoramento de condição moderno pode ser denominado como Monitoramento Inteligente de Condição (ICM – *intelligent condition monitoring*), que deve possuir características de processamento de cálculo rápido, análise inteligente.

Tabela 1 – Questões gerais sobre o monitoramento de condições

Tarefa	Processo	Técnica principal	Característica	Resultado (saída)
Como monitorar variáveis?	Aquisição de dados	Sensoriamento, conversão A/D comunicação.	Tempo real, captura contínua e frequente.	Dados brutos ou pré-processados, com interferências.
Existe um defeito?	Deteção de defeito	Processamento digital de sinais.	Preditiva	Alertas, dados resumidos.
Qual o tipo de defeito e sua localização?	Reconhecimento de padrões, classificação de dados.	Lógica fuzzy, sistemas especialistas, redes neurais.	Tempo real e ação automática	Lista de defeitos, sugestões de ações ou de manutenção, detalhes sobre diagnóstico.
O que deve ser feito?	Assinalamento de estado e tomada de decisão			

Fonte: Traduzido de HAN e SONG, 2003

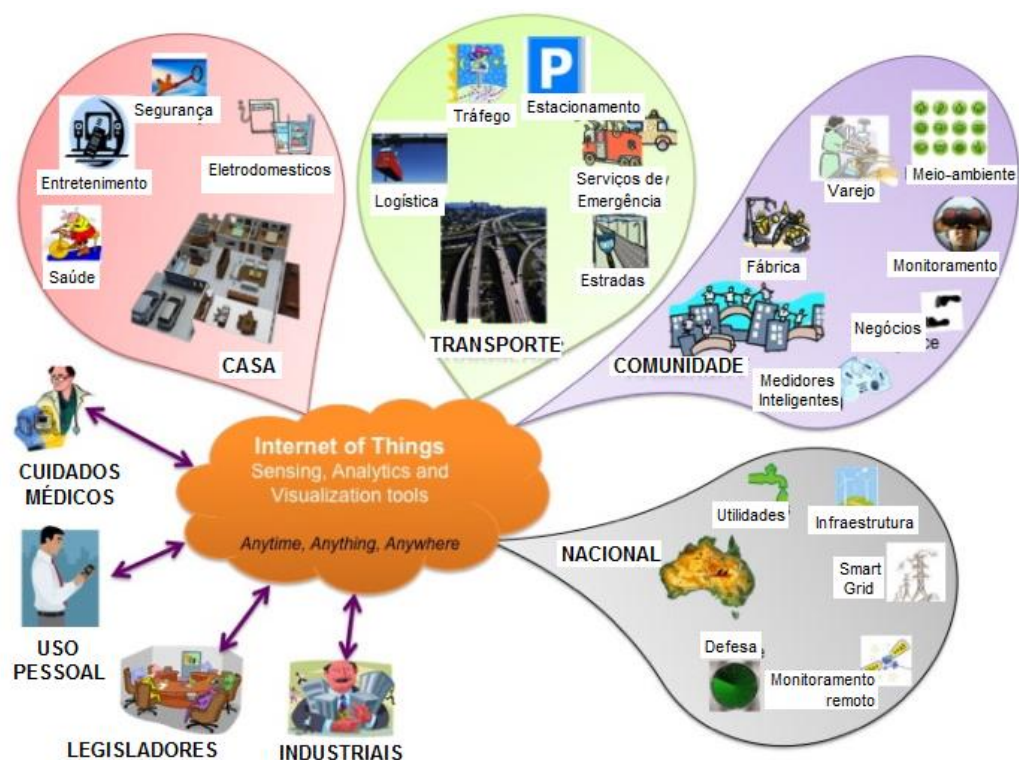
## 2.2 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) pode ser entendida como uma rede de dispositivos capazes de realizar controle e comunicar dados através da Internet. Estes dispositivos possuem capacidade de processamento local, de forma a interagir com seus estados internos (que caracterizam o controle) ou variáveis do ambiente externo (que caracterizam os dados a serem veiculados). Esta arquitetura apresenta o potencial para permitir o monitoramento e controle remoto de uma ampla rede de dispositivos interconectados em um sistema complexo. Ela também se apoia de forma vantajosa sobre a infraestrutura de telecomunicações atual (GUBBI, 2013).

A Internet das Coisas está sendo utilizada em diversas áreas de aplicação, tal como em instalações de fabricação (automação de chão de fábrica), redes de energia, monitoramento de saúde, de segurança, monitoramento ambiental, entretenimento, sistemas de transporte, etc. Essas aplicações estão sendo conectadas à Internet, e, portanto, podem ser controladas e monitoradas a partir de qualquer lugar. Essa conectividade significa uma maior quantidade de dados, recolhidos a partir de mais lugares, com muitas maneiras de aumentar a eficiência e melhorar a proteção e segurança.

A Figura 2 mostra alguns exemplos dos domínios de aplicação de IoT agrupados com base no impacto produzido pelos dados gerados (GUBBI, 2013). Os usuários vão desde o simples indivíduo (e seus dados pessoais) até as organizações de nível nacional que abordam questões amplas de infraestrutura, utilidades, defesa, etc.

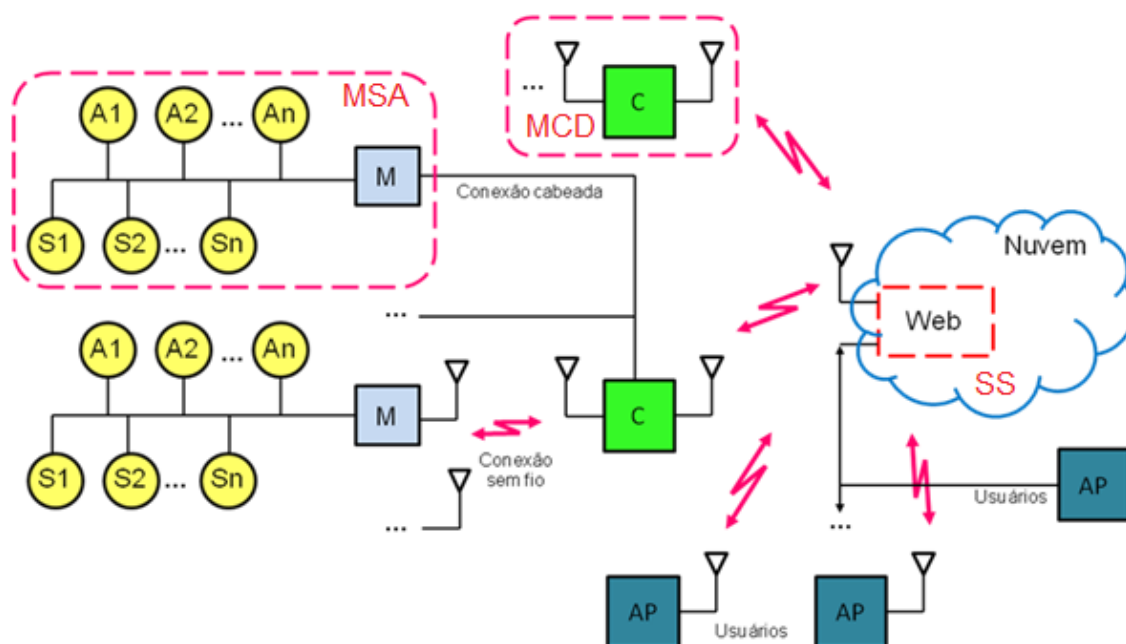
Figura 2 – Áreas de aplicação e usuários de IoT



Fonte: Traduzido de GUBBI, 2013.

Ilustra-se na Figura 3 a proposta de uma plataforma de IoT implementada por meio de uma arquitetura de RSSF, utilizada no presente trabalho. Nesta plataforma, diversos Módulos Sensores-Atuadores (MSA) constituem os nós remotos da rede, que estão associados localmente a sensores (Sn) e atuadores (An), e se comunicam via rádio com um nó base, Módulo Concentrador de Dados (MCD), perfazendo no conjunto uma RSSF altamente flexível e expansível.

Figura 3 – Plataforma de IoT.



Fonte: BEHRENS, 2016.

Legenda:

An – Atuadores

AP – Aplicação

Sn – Sensores

SS – Sistema de Aplicação

M – Microcontrolador

MSA – Módulo Sensor-Atuador

C – Concentrador

MCD – Módulo Concentrador de Dados

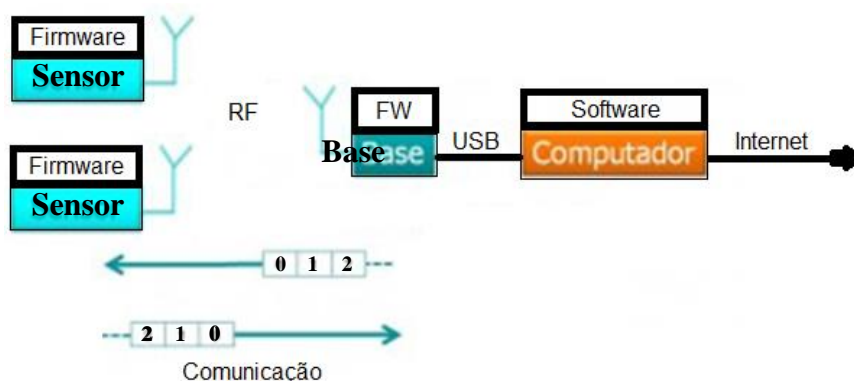
Um MCD coleta os dados capturados por um ou mais MSA's, realiza um tratamento preliminar desses dados visando sua sumarização, e na sequência se comunica via Internet com um Sistema Supervisório ou de Aplicação (SS) hospedada em um servidor específico ou na nuvem, permitindo o acesso às informações do processo supervisionado por parte de usuários conectados por meio de aplicativos (AP). A aplicação SS realiza a análise final dos dados, mantém o histórico completo das informações coletadas, gera relatórios que facilitem o entendimento da informação de interesse pelos usuários do sistema e é responsável pela comunicação de alarmes nos casos em que as variáveis monitoradas exibam um comportamento fora do seu padrão normal (BEHRENS, 2016).

### 2.3 Rede de Sensores Sem Fio (RSSF)

Com o desenvolvimento atual das tecnologias de microeletrônica utilizadas na fabricação de circuitos integrados (ICs) e de sistemas micro-eletrônicos (MEMS), tornou-se possível a construção de microcontroladores de grande poder computacional, associados a uma ampla gama de sensores e de transceptores para comunicação via rádio (sem fio). Dessa forma, tornou-se viável o desenvolvimento de dispositivos miniaturizados e de baixo custo, com capacidade de realizar sensoriamento, computação, atuação e comunicação sem fio em curtas e médias distâncias. Estes dispositivos podem ser configurados para operar como nós de uma rede de nós interconectados, e assim formar uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), onde a vantagem estratégica de sua aplicação se dá por conta da facilidade de instalação da rede, sem necessidade de infraestrutura de cabeamento (AKYILDIZ, 2002). As RSSFs têm uma grande capacidade de detecção de eventos e medição de variáveis em qualquer lugar, sendo expansíveis e reconfiguráveis.

No presente projeto, a rede de sensores sem fio foi implementada com base na Plataforma Rádium (BRANQUINHO, 2015), que possui arquitetura aberta que engloba conceitos de RSSF, pilha de protocolos e modelamento em camadas bem definidas. Para se desenvolver um projeto com essa plataforma de rádio, é necessário compreender os elementos que compõem a aplicação (*hardware, firmware e software*). A Figura 4 ilustra os componentes de uma RSSF implementada com a Plataforma Rádium.

Figura 4 – Componentes de uma RSSF.



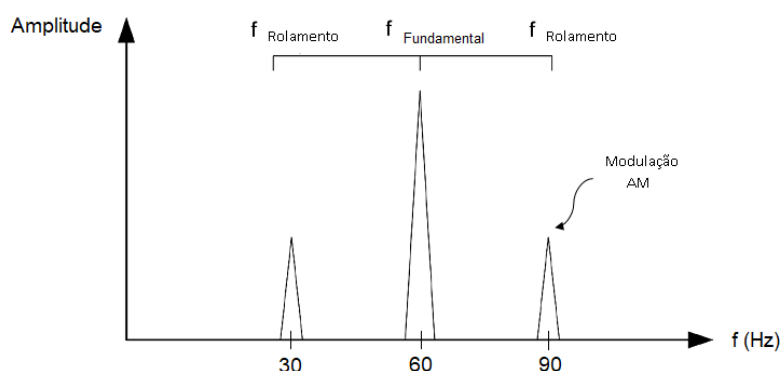


O caso mais simples engloba um computador, um nó base e um nó sensor. A base está conectada ao computador por meio de um cabo USB. Os nós sensores são “entidades” que monitoram grandezas (temperatura, luminosidade, umidade, pressão, tensão, corrente, etc.), e podem também atuar sobre dispositivos (bombas, motores, lâmpadas, entre outros). Todas as informações dos sensores são coletadas pela base, formando o conceito de gerência de rede e das informações (AZZINI, 2016).

## 2.4 Análise de Assinatura de Corrente

O método de análise de assinatura de corrente, conhecido em sua aplicação em motores elétricos como *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) (EREN, 2016), fornece uma maneira não intrusiva para monitorar continuamente a condição de um motor elétrico e consiste na medição de corrente elétrica em tempo real e seu processamento no domínio da frequência, através do cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT) da forma de onda da corrente capturada no domínio do tempo. A análise do espectro de frequências obtido de um equipamento elétrico alimentado por tensão CA pode exibir, além da componente principal de 60 Hz, diversas outras componentes de frequências típicas do equipamento. Em motores elétricos, por exemplo, rolamentos, correias e a própria carga conectada ao eixo do motor revelam frequências típicas, que são superpostas à frequência de 60 Hz da rede elétrica. A Figura 5 ilustra um exemplo de aplicação da técnica de MCSA (MILJKOVIC, 2015).

Figura 5 – Componentes de frequência de banda lateral devido a rolamentos danificados.



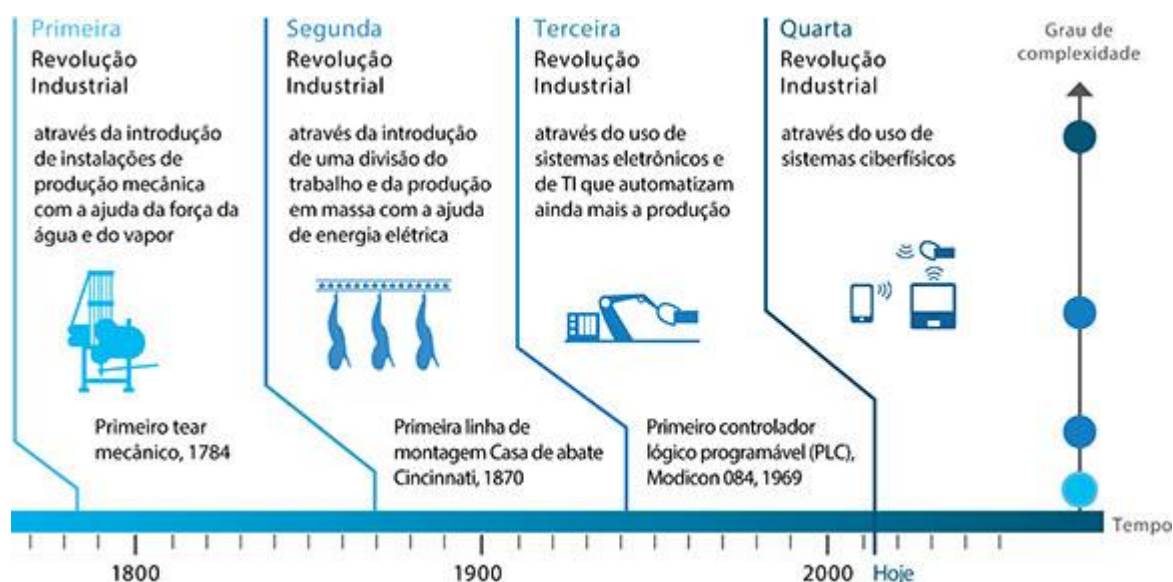
Fonte: MILJKOVIC, 2015.

A caracterização do espectro de frequências de uma máquina no seu momento inicial de operação pode ser utilizada para futuras comparações de medições. Com a alteração da assinatura de corrente no decorrer do tempo, é possível acompanhar sua evolução e diagnosticar antecipadamente a futura ocorrência de uma anomalia ou desgaste no equipamento. Dessa forma, torna-se possível colocar em prática uma sistemática de manutenção baseada na condição, programando-se eventos de manutenção que não interfiram com o ritmo de produção.

## 2.5 Indústria 4.0

O processo de industrialização iniciou-se com a introdução de equipamentos mecânicos de fabricação no final do século 18, evento denominado de Primeira Revolução Industrial, quando máquinas mecanizadas revolucionaram a forma como os bens eram feitos (Barbosa, 2017). A Figura 6 mostra a evolução da industrialização ao longo do tempo.

Figura 6 – Os quatro estágios da Revolução Industrial



Fonte: Traduzido de Barbosa, 2017.

A Segunda Revolução Industrial teve início em torno da virada do século 20 e envolveu a utilização de energia elétrica e produção em massa de bens, com base na divisão do trabalho. Essa organização do processo produtivo foi superada pela Terceira Revolução Industrial, que começou durante o início da

década de 1970 e continua até os dias de hoje. Ela emprega equipamentos eletrônicos de controle, computação e tecnologia da informação (TI) para alcançar maior automação dos processos de fabricação. Dessa forma, as máquinas passaram a assumir não só uma proporção substancial do "trabalho manual", mas também uma parte do "trabalho intelectual" (Barbosa, 2017).

Atualmente a Alemanha exerce um papel importante no contexto industrial global e precisa garantir a sua liderança como o principal fornecedor mundial de equipamentos e máquinas de produção industrial. Empresas alemãs se organizaram para definir as características e pôr em marcha à Quarta Revolução Industrial, denominada comumente como Indústria 4.0 (KAGERMANN, 2013).

Numa fábrica da Indústria 4.0, as máquinas estão conectadas como uma comunidade colaborativa, aproveitando a atual disseminação da Internet das Coisas (IoT) no ambiente de fabril. Tal evolução exige a adoção de um alto grau de automação dos processos fabris, a utilização de uma ampla rede de sensoriamento das variáveis físicas de interesse, a comunicação de dados para sistemas de processamento locais e proprietários e para sistemas em nuvem, e a utilização de ferramentas avançadas para que os dados possam ser processados sistematicamente e convertidos em informações, visando, assim, a tomada de decisão informatizada (LEE, 2014).

Dentro desse contexto, a Internet de Coisas faz com que seja possível criar redes de sensores e atuadores que incorporem toda a fabricação e o respectivo processo, de modo a converter as fábricas em um ambiente inteligente. Os sistemas de produção devem ser compostos por máquinas inteligentes, sistemas de armazenagem e estoque e instalações de produção, cujos dados operacionais são integrados com base na tecnologia de informação e comunicação (TIC), de ponta a ponta, desde a logística de entrada de insumos, passando pela produção, até a logística de saída dos bens produzidos, levando inclusive em conta aspectos de marketing e a cooperação mais estreita entre os parceiros de negócio (fornecedores e clientes). Isso permite que a produção seja configurada de forma mais flexível e abre oportunidades para uma gestão diferenciada dos processos de fabricação. A Figura 7 representa uma aplicação

do IoT no ambiente de fabricação. As tendências da tecnologia IoT afetam a empresa em vários níveis de integração na fabricação. Em vista dessas tendências, uma evolução dos sistemas de produção industrial traz alguns benefícios esperados (VENTURELLI, 2014):

- Redução de custos;
- Economia de energia;
- Aumento de segurança;
- Conservação ambiental;
- Redução de erros;
- Fim dos resíduos;
- Transparência no negócio;
- Aumento da qualidade de vida;
- Personalização e escala sem precedentes.

A tecnologia de base responsável por este conceito de Indústria 4.0 é a IoT, que faz a conexão lógica entre todos os dispositivos e meios relacionados ao ambiente produtivo: sensores, transmissores, computadores, células de produção, sistema de planejamento de produção, diretrizes estratégicas da indústria, informações governamentais, clima e fornecedores, tudo sendo medido, armazenado e analisado em sistema de banco de dados unificado (VENTURELLI, 2014), conforme descrito na Figura 7.

Figura 7 – Internet das coisas na Indústria



Fonte: Traduzido de Barbosa, 2017.

De acordo com BARBOSA 2017, as indústrias do dia a dia estão buscando digitalizar seus processos de fabricação, além de introduzir sistemas de controle e monitoramento ao longo do chão de fábrica. As funcionalidades da Internet e os serviços baseados em dados vêm sendo introduzidos em processos para inovar a produção com base no paradigma da Indústria 4.0. Este novo conceito, também chamado de fabricação avançada, fábrica digital ou Internet industrial, traz benefícios para os processos de produção e causa uma transformação completa da cadeia de valor através do armazenamento das informações em serviços baseados na nuvem. Os conceitos de Indústria 4.0 contribuem significativamente para auxiliar os novos processos de fabricação em vários setores da indústria, além de promover ganhos, como, maior produtividade, padronização, ergonomia, flexibilidade, manutenção, trabalho, baseado em IoT que conecta os mundos digital e real.

Segundo WOLLSCHLAEGER 2017, a aplicação das ideias de Sistemas Ciberfísicos e Internet das Coisas no domínio da automação industrial levou à definição do conceito da Indústria 4.0, a uma quarta Revolução industrial habilitada pela Internet tecnológica para criar uma produção inteligente, produtos inteligentes e serviços inteligentes. Uma das características atraentes do conceito IoT é a perspectiva de se poder usar qualquer dispositivo atualmente existente para acesso à internet para acessar dados industriais.

O grande interesse das indústrias de telecomunicações em aplicações industriais é consequência direta da adoção do IoT em cenários ciberfísicos. A adoção das tecnologias de IoT na automação crescerá substancialmente. Essas tecnologias precisam ser avaliadas e adaptadas às necessidades de automação industrial. Um dos principais desafios da futura comunicação industrial será a gestão de complexidade e heterogeneidade.

### 3 MÉTODO

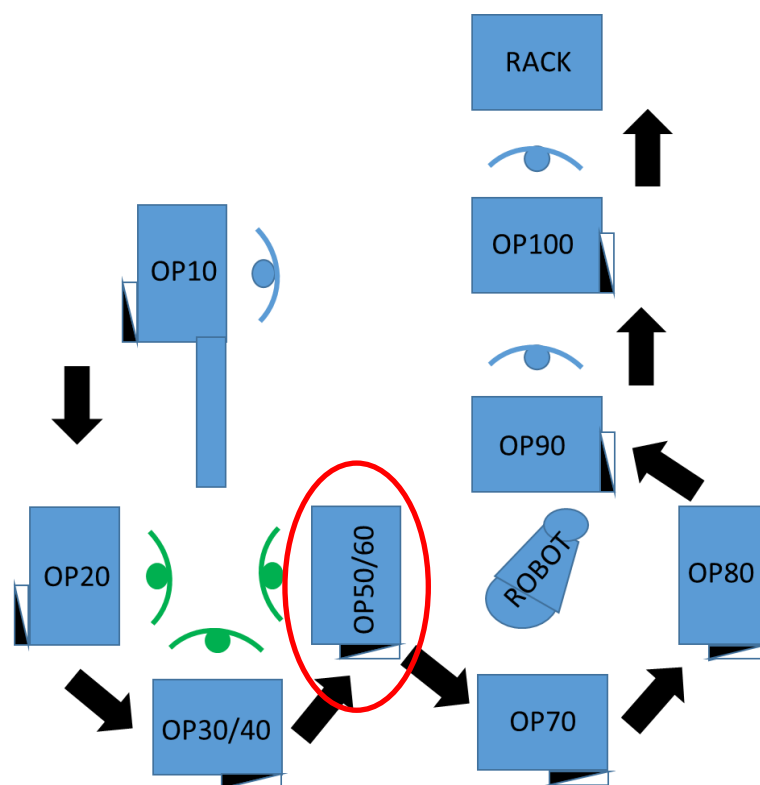
A seguir, o método empregado no desenvolvimento do sistema de monitoramento de equipamentos industriais é apresentado, bem como a escolha do estudo de caso utilizado para validá-lo.

#### 3.1 Estudo de Caso








Foi escolhido como local de estudo, uma linha de produção de uma empresa do setor automotivo, situada em Limeira SP, onde foram selecionadas algumas máquinas, que trabalham de modo praticamente contínuo, com curtos intervalos de parada. A linha MSG (*Mechanical Steering Gear*), escolhida, é uma linha de montagem para diferentes tipos de conjuntos de direção mecânica para veículos. A linha é constituída por 8 bancadas e dividida em 10 estações de trabalho, onde 4 são estações de testes e manipuladas por um robô de 6 eixos e as outras 6 estações são operadas por 4 operadores de produção. O tempo de ciclo de cada operação é de 40 segundos. A linha produz três tipos de direção mecânica, para um fabricante exclusivo de automóveis, onde a capacidade de produção foi definida pelo cliente. Escolheu-se a linha MSG, pois a mesma possui os maiores índices de produção da fábrica, sendo que qualquer parada produtiva causa grande impacto de produtividade.

Apresenta-se na Figura 8 o leiaute da linha a ser estudada, mostrando a disposição das estações de trabalho. Cada estação tem o objetivo de realizar a integração de alguns componentes da direção mecânica em uma carcaça de alumínio. Tais componentes são posicionados manualmente por um operador, e a fixação final dos mesmos é feita através da inserção automática, realizada por uma máquina apropriada, cuja força motriz provém de um motor elétrico. A estação de trabalho circulada de vermelho, no leiaute da Figura 8, é o objeto de estudo deste trabalho.

Figura 8 – Layout da linha MSG sob estudo.



Legenda:

-  Um operador para três bancadas
-  Painel elétrico
-  Um operador por bancada
-  Fluxo de produção
-  Bancada e/ou estação de montagem de componentes
-  Área manipulada por robô industrial
-  Saída de produto acabado

### 3.2 Objeto de Estudo

As máquinas são constituídas de perfis tubulares, chapas de aço e perfis de alumínio anodizado que suportam os seguintes dispositivos: 1. Painel elétrico, 2. Painel pneumático, 3. Interface Homem Máquina (IHM), 4. Dispositivo de indexação do produto, 5. Sensores de visão, 6. Leitor de códigos de barra, 7. Botoeira de acionamento, 8. Dispositivos de inserção, 9. Mesa giratória, 10. Barreiras de luz, 11. Sistema de lubrificação, 12. Atuadores pneumáticos e 13. Servo Motor. A Figura 9 ilustra uma máquina típica da linha MSG situando a maioria dos componentes acima listados.

Figura 9 – Equipamento típico da linha MSG.



Na linha MSG, foi escolhida a estação de trabalho OP50-60, que é uma operação dupla, energizada por único painel de controle industrial, um lado da estação, OP50, é responsável pelas atividades de montagem, aperto do sistema, e abastecido por operador humano. No outro lado, denominado OP60, é feito o amaciamento do acoplamento dos componentes anteriormente instalados, e o produto semiacabado é removido por um robô industrial. Pelo fato da estação de trabalho OP50-60 possuir maior facilidade de acesso ao painel elétrico, de forma que qualquer ação não interfira no processo produtivo, o sistema de monitoramento de corrente será montado neste painel.

A Tabela 2 apresenta os valores dos dados de consumo de corrente das diversas estações de trabalho da linha MSG, medidos por meio de um



amperímetro manual tipo alicate em cada um dos painéis de controle de cada bancada (Figura 10), destacando-se no retângulo vermelho o consumo da operação OP50-60, que dá base ao dimensionamento da escala de medidas do sistema de monitoramento a ser incorporado a essa máquina.

Tabela 2 – Caracterização inicial do consumo de corrente(A).

Descrição	Corrente	Fase 1	Fase 2	Fase 3
OP 10 - Montagem dos Coxins	Standy By	1,5	1,6	0,6
	Máxima	10,3	10,1	9,7
OP 20 - Montagem Cremalheira Rolamento Interno	Standy By	1	1	0,5
	Máxima	5,7	5,4	5,9
OP 30 - 40 - Montagem Anel e Rolamento - Montagem Pinhão	Standy By	0,5	1	1,2
	Máxima	11,4	11	10,7
OP 50 - 60 Montagem, aperto do sistema e Amaciamento	Standy By	0,5	1,3	1
	Máxima	3,9	4,3	3,6
OP 70 - Regulagem de Folga	Standy By	0,5	1,1	1,1
	Máxima	1,7	2,1	2,1
OP 80 - Esforço de esterçamento	Standy By	0,3	1	1,1
	Máxima	2,6	3,9	3,4
OP 90 - Eixo interno,Coifa e abraçadeiras	Standy By	1,1	1,2	0,6
	Máxima	9,2	12,1	8,9
OP 100 - Eixo externo e proteção do Pinhão	Standy By	1,1	1	0,7
	Máxima	5,4	5	5,1

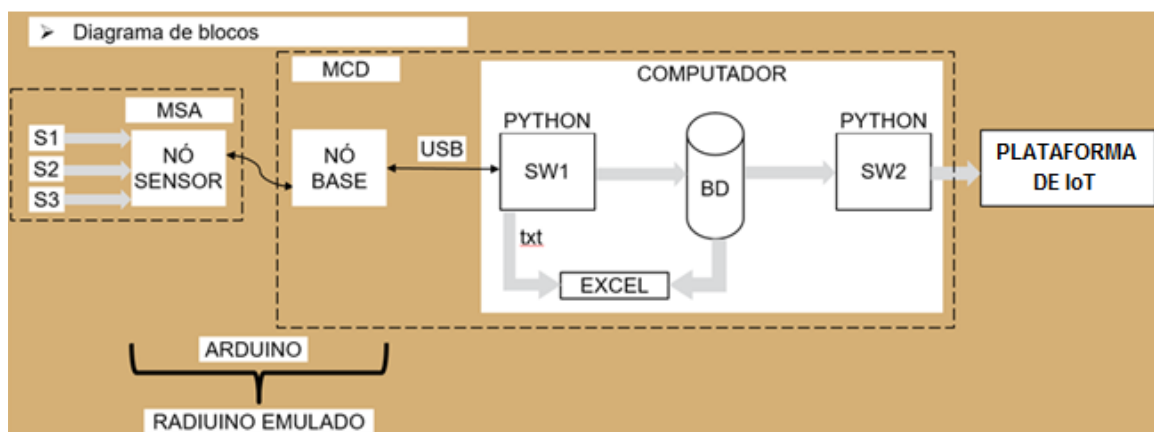
Figura 10 – Medida preliminar de consumo de corrente com amperímetro manual.



### 3.3 Sistema de monitoramento

A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos do sistema de monitoramento de correntes trifásicas.

Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento.



Como elemento de processamento para implementar as funções dos módulos MSA e MCD, utilizou-se um módulo Arduino Uno R3 (ARDUINO), mostrado na Figura 12. O Arduino Uno é um kit de desenvolvimento baseado no microcontrolador ATmega328P, construída numa configuração modular que lhe confere facilidade de ser interconectada e de ser expandida. Possui 14 pinos de entrada ou saída digitais (dos quais 6 podem ser utilizados como saídas moduladas por largura de pulso (PWM), 6 entradas analógicas para conversão A/D de 10 bits, um cristal de quartzo de 16 MHz, uma conexão USB, uma conector de energia e respectivo regulador de tensão e um botão de reinicialização. Este módulo contém todo o circuito eletrônico necessário para suportar o microcontrolador, bastando apenas conectá-lo a um computador por meio de um cabo USB ou ligá-lo com um adaptador AC-DC ou bateria de 9 volts.

O microcontrolador na placa é programado usando uma linguagem de programação baseada em C/C++ e o ambiente de desenvolvimento IDE (*Integrated Development Environment*) (ARDUINO).

Figura 12 – Arduino Uno R3



Fonte: (ARDUINO)

O Arduino pode ser configurado por software para exercer uma aplicação isolada, de forma autônoma, ou pode se comunicar via USB com algum software em execução em um computador (UMA, 2017).

Em termos funcionais, o módulo Arduino Uno foi utilizado no presente projeto para capturar os sinais analógicos que são gerados pelos sensores de corrente, convertendo-os para dados digitais, que são armazenados em memória, processados de acordo com um programa localmente instalado (*firmware*) e transmitidos via USB para um computador externo.

As medidas das três correntes de fase foram realizadas pelos sensores de corrente alternada S1, S2 e S3 (Figura 11), conhecidos como transformadores de corrente (TC). Utilizou-se nesta aplicação três unidades do sensor SCT013 (Figura 13), que trabalha com uma corrente alternada de entrada entre 0 a 100 A e gera uma corrente de saída proporcional de 33 mA, operando na faixa de temperatura de -25 a +70° C. Porém, as entradas analógicas do microcontrolador fazem apenas a captura de variações de tensão. Segundo o *datasheet* (SCT-013), deve-se inserir o circuito elétrico de interface composto por um resistor de carga de 33  $\Omega$  em paralelo com o sensor para converter o sinal de corrente num sinal de tensão e adicionar um deslocamento de tensão de 2,5 volts através de um divisor de tensão composto por dois resistores de 10 k  $\Omega$  conectados em série. Um capacitor de 10  $\mu$ F faz a filtragem de ruídos.

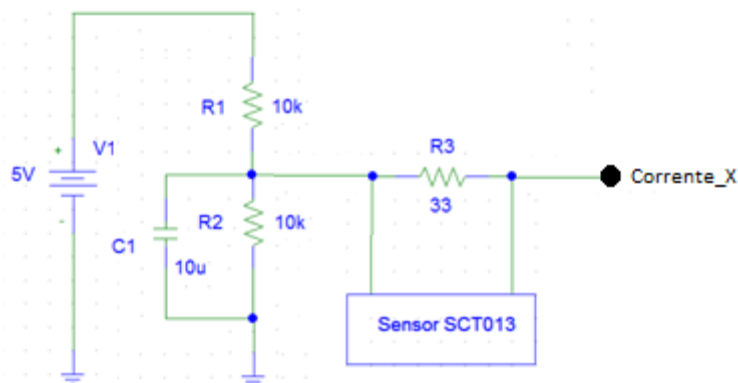
Figura 13 – Sensor de corrente SCT013



Fonte: (SCT-013)

O circuito de interface anexo a cada sensor de corrente SCT-013 está mostrado na Figura 14. O conjunto de componentes de interface para os três sensores de corrente foram montados numa placa de circuito impresso auxiliar (placa adaptadora, ou *shield*) para ser conectada diretamente sobre o módulo Arduino (vide detalhe da Figura 16).

Figura 14 – Circuito sensor de corrente SCT013



Fonte: (SCT-013)

Um software em linguagem C++ (vide anexo A) foi desenvolvido no ambiente de desenvolvimento (IDE) da plataforma Arduino para capturar os valores analógicos de tensão correspondentes a corrente trifásica consumida pelo equipamento, medida pelos sensores. Na captura dos dados das correntes, o software faz uso da biblioteca EmonLib [EMONLIB], que operacionaliza uma sequência de medidas instantâneas da variável de entrada e calcula automaticamente o valor RMS correspondente. Nesse processo, foi constatado que o software, após compilação e *download* para instalação no microcontrolador,

executa um *loop* de medidas das três correntes a cada 1,58 segundos, ou seja, a uma taxa de 0,63 Hz.

Essa taxa de amostragem é suficiente para o acompanhamento do consumo de corrente para fins de detecção de normalidade ou anormalidade da operação da estação de trabalho OP50-60. Entretanto, para fins de análise de assinatura de corrente, tal taxa de amostragem torna-se inadequada para captura de eventos rápidos presentes na forma de onda da corrente medida. De acordo com o teorema de Nyquist, a taxa de amostragem de um sinal deve ser igual ou maior a duas vezes a frequência máxima do sinal amostrado (SMITH). Em se tratando de capturar toda a gama de frequências harmônicas de um sinal de corrente alternada em equipamentos industriais, deve-se considerar até a 20ª ou 25ª harmônica (SCHNEIDER), ou seja, o sinal amostrado pode ter componentes até 1,2 ou 1,5 kHz. Dessa forma, a taxa de amostragem ideal seria pelo menos 3,0 kHz, um valor bem acima de 0,63 Hz. Considerações sobre esse requisito e seu impacto nos resultados serão discutidas nos Capítulos 5 e 6.

Para garantir a precisão dos resultados obtidos, os sensores foram aferidos contra um multímetro profissional. Realizou-se uma série de medidas com cada sensor, utilizando uma fonte e cargas resistivas variáveis, e tomou-se como valor de referência os dados obtidos por um multímetro de qualidade de uso profissional, marca Minipa modelo ET-2042D (MINIPA).

Esses valores foram plotados num gráfico do aplicativo Excel, sendo no eixo horizontal os valores medidos pelos sensores e no eixo vertical os dados de referência medidos com o multímetro (vide Anexo A). Foi possível obter uma equação da reta do tipo  $Y = AX + B$ , onde X são os dados dos sensores e Y do multímetro. As equações de aferição obtidas foram:

$$\text{Sensor 1: Equação de aferição: } Y = 0,9838X - 0,1382 \quad (1)$$

$$\text{Sensor 2: Equação de aferição: } Y = 0,9861X - 0,1858 \quad (2)$$

$$\text{Sensor 3: Equação de aferição: } Y = 0,9822X + 0,1685 \quad (3)$$

Em todos os casos, o valor do coeficiente de determinação  $R^2$  (medida descritiva da qualidade do ajuste do modelo estatístico de regressão, que varia de 0 a 1, indicando em porcentagem quanto à variabilidade nos dados é explicada pelo modelo) foi maior do que 0,999, ou seja, muito próximo de 1, demonstrando que as equações de correção se ajustam bem aos valores obtidos. As equações de aferição (1) a (3) acima foram incorporadas no *firmware* programado no módulo Arduino.

Como pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 11, utilizou-se a estratégia de emulação da comunicação sem fio, via rádio, com a escrita de um *firmware* unificado, instalado na plataforma Arduino, realizando virtualmente as operações de transmissão e recepção. A proposta inicial era conectar um nó sensor (MSA) a um nó base (MCD) por meio de comunicação sem fio, utilizando módulos Rádium. Entretanto, a alternativa emulada foi empregada com o objetivo de se evitar que o experimento instalado no objeto de estudo causasse interferências de radiofrequência no ambiente industrial. Portanto, sem perda de generalidade, a opção de comunicação emulada constituiu uma solução provisória e necessária à prova de conceito, sendo que a solução final pode a qualquer momento ser convertida para uma arquitetura de RSSF conforme descrito nas seções 2.2 e 2.3.

Na sequência, as informações recebidas pela parte receptora do rádio emulado, são enviadas a um computador portátil via USB, onde um aplicativo específico, escrito em linguagem de programação Python, realiza o processamento complementar relativo ao MCD.

O sistema de monitoramento de correntes medidas trifásicas foi desenvolvido conforme mostrado nas Figura 15 e 16. Na Figura 16 pode-se ver em detalhe a placa adaptadora contendo os componentes do circuito de interface dos sensores, montada sobre o módulo Arduino, aproveitando os terminais padronizados de conexão. A Figura 17 apresenta os resultados preliminares de medidas de corrente das três fases, sem aferição, monitorando um circuito monofásico apenas por simplicidade, onde se observa a discrepância dos valores, que em princípio deveriam ser idênticos. Após a aferição e utilização das



equações de correção, as três medidas de corrente passaram a apresentar valores mais próximos.

Figura 15 – Montagem experimental para medidas de corrente trifásicas.

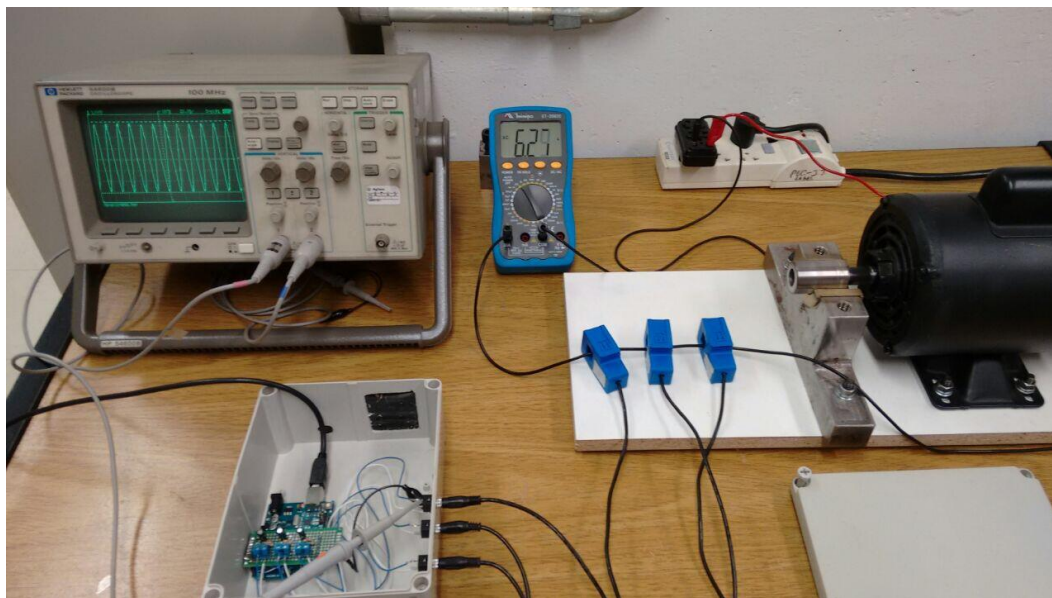


Figura 16 – Detalhe do circuito eletrônico desenvolvido.

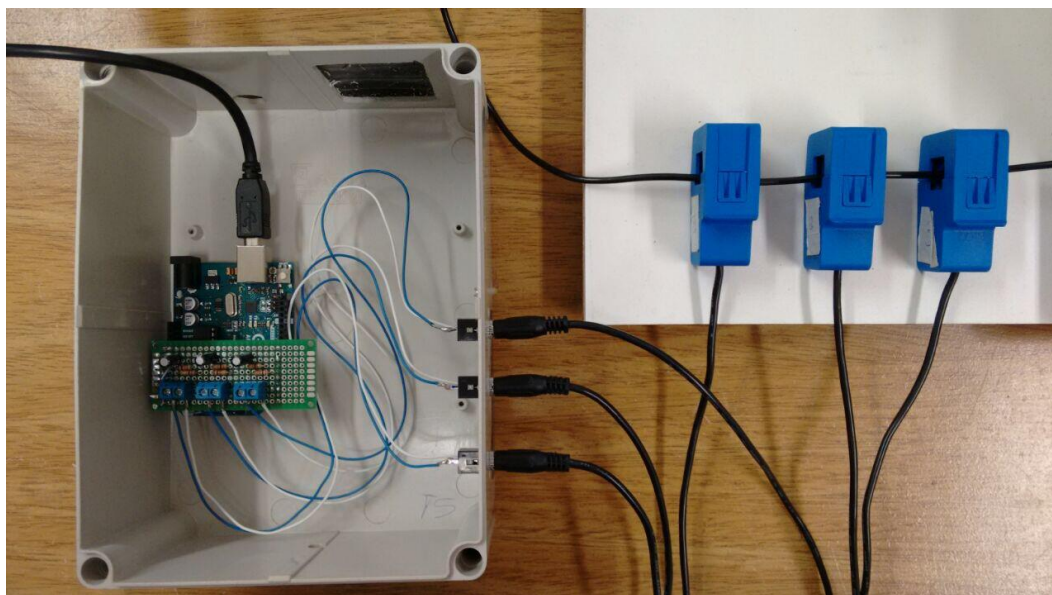
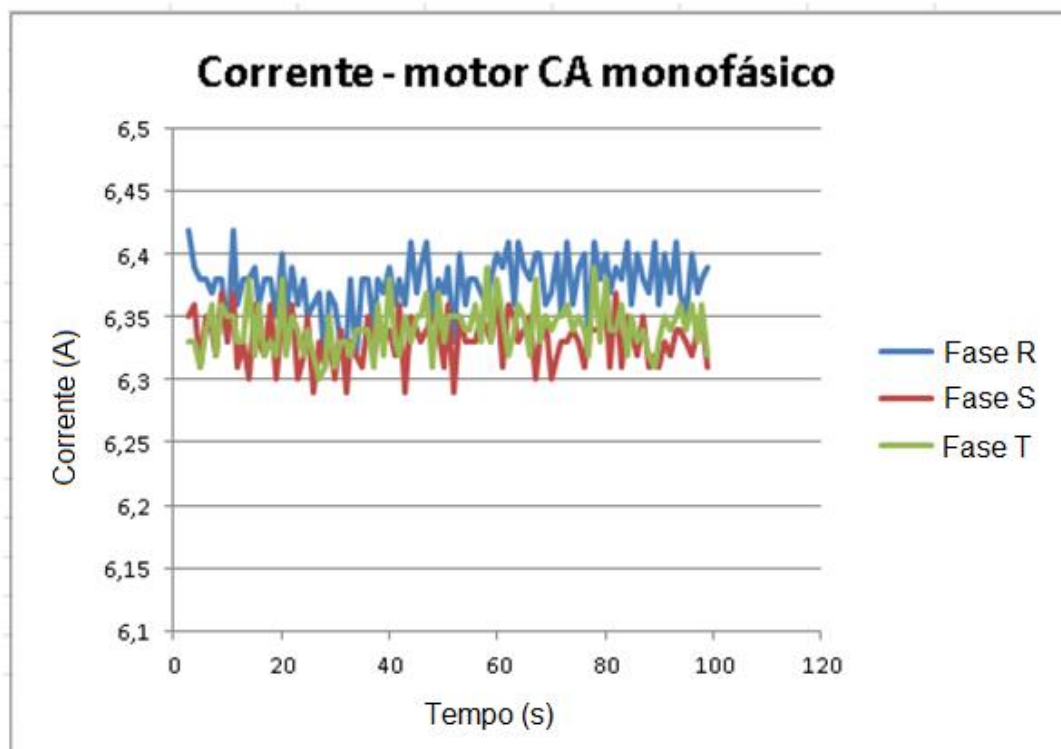




Figura 17 – Medidas preliminares de corrente.



O sistema de medida de correntes trifásicas da Figura 15 implementa as funções de um módulo MSA e a parte de recepção de dados de um módulo MCD, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 11. Na sequência, os dados capturados são enviados, via comunicação USB, a um computador pessoal portátil, usado para implementar as funções de pré-processamento, armazenamento em banco de dados local e comunicação de dados via internet.

O sistema de armazenamento de dados usa um banco de dados MySQL, executado em um servidor web (FRIENDS, 2014) para armazenar os dados coletados pelo software Python SW1. O servidor web é hospedado no computador portátil instalado junto ao painel elétrico da máquina monitorada (operação OP50-60). Tanto o banco de dados MySQL, quanto o servidor web são partes do XAMPP, que é uma distribuição de fonte aberta, contendo MySQL, PHP e Perl. O MySQL suporta a criação da base de dados e comandos de linguagem de consulta estruturada no padrão SQL para inserir, atualizar e excluir dados dinamicamente.

Os aplicativos SW1 e SW2 mostrados na Figura 11 foram escritos em linguagem de programação Python versão 2.7.13 (KOEPEKE, 2011) e destinam-se,

respectivamente, a armazenar os dados coletados pelos sensores no banco de dados, e a enviá-los à plataforma de IoT. O funcionamento desses dois aplicativos ocorre de forma independente, porém tendo como ponto de acesso comum o banco de dados local.

Existem atualmente diversas opções de plataformas e serviços de armazenamento de dados para aplicações de IoT, como por exemplo as plataformas MindSphere (SIEMENS), a BlueMix (IBM) e a Tago. A plataforma Tago (TAGO) é um ambiente de gerenciamento e monitoramento de dados *online*, utilizada para aplicações de IoT. Nessa plataforma estão disponíveis ferramentas de análise e emissão de alertas, que podem ser manipuladas pelo usuário conforme a necessidade. Escolheu-se para este trabalho a plataforma Tago devido a sua simplicidade de uso e pela disponibilidade de suporte por parte dos desenvolvedores, os quais contribuíram para solução de problemas e esclarecimentos a cerca das características operacionais e de configuração da ferramenta.

A Figura 18 mostra a vista OP50 da estação de trabalho OP50-60 escolhida como objeto de estudo, onde um operador humano realiza a manipulação dos insumos e componentes para a manufatura. A Figura 19 mostra a vista OP60, acessado por um robô industrial que retira a peça produzida e a encaminha às operações subsequentes. O sistema de monitoramento desenvolvido neste trabalho foi montado no painel elétrico de alimentação da estação OP50-60, identificado pela elipse vermelha na Figura 20, para monitoramento da corrente das três fases de alimentação da máquina.

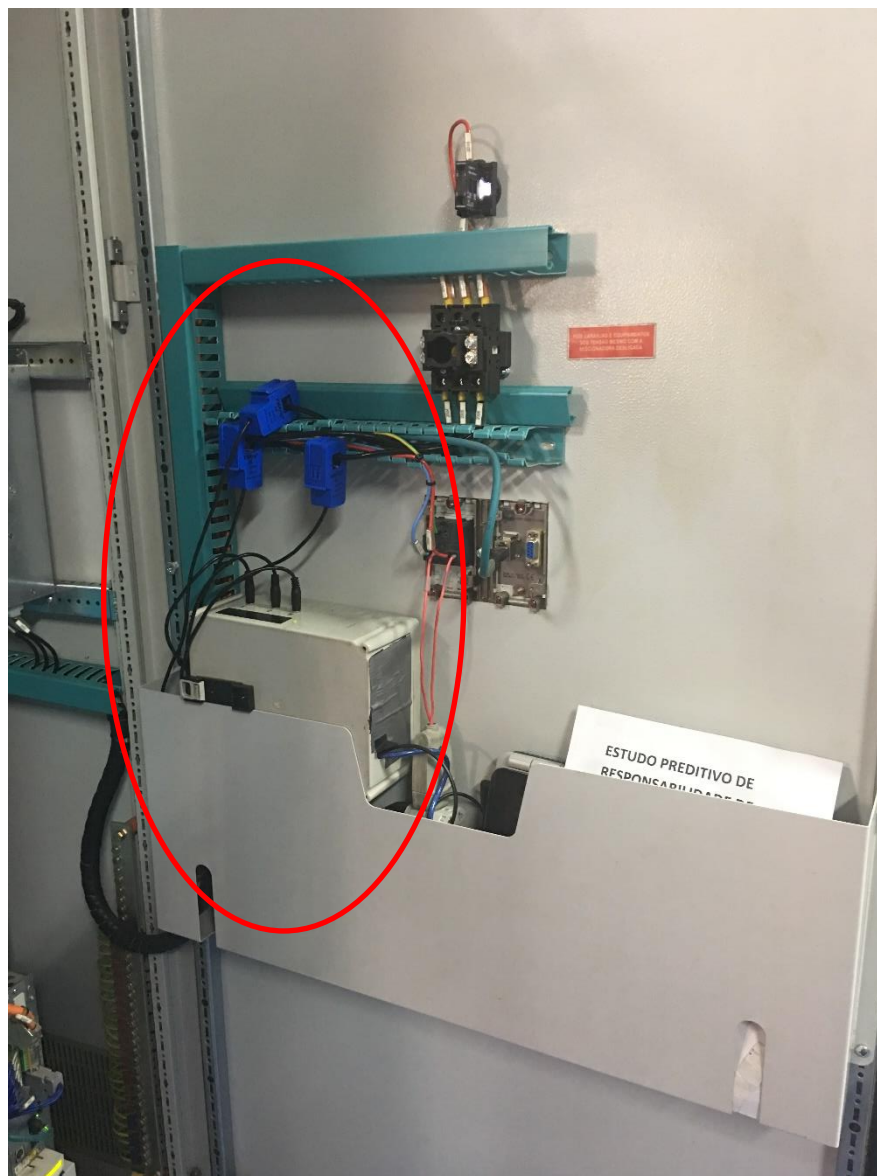
Figura 18 – Lado OP50 da estação OP50-60 da linha MSG com sua IHM.



Figura 19 – Lado OP60 da estação OP50-60 da linha MSG.



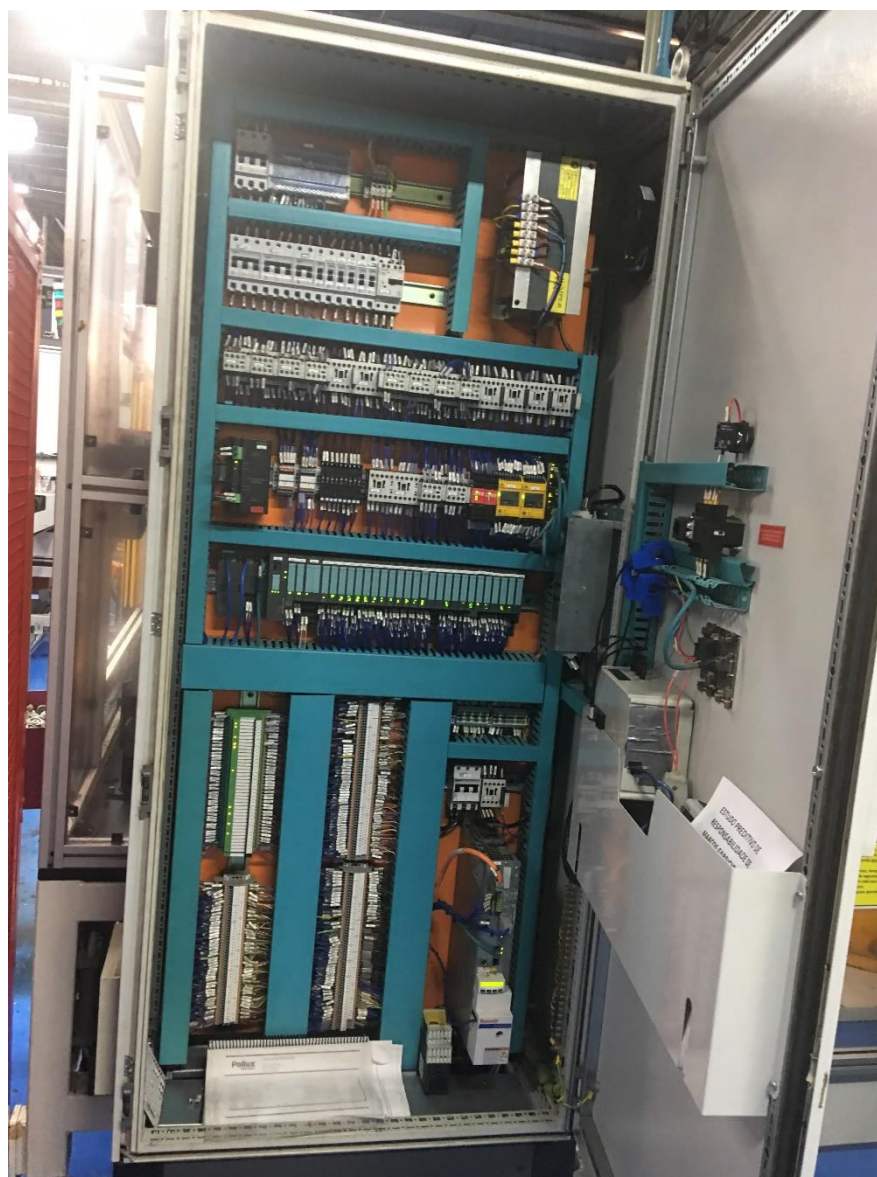
Figura 20 – Inserção do equipamento de monitoração de corrente no painel elétrico.



A Figura 21 traz uma visão completa do painel de controle, onde se pode ver que a estação OP50-60 já possui diversos sistemas de controle e automação, que por sua vez estão conectados ao sistema de aquisição de dados da indústria para gestão dos dados de produção. O sistema de monitoramento desenvolvido atua de forma paralela e não intrusiva, permitindo agregar novas funções de gestão das características operacionais da máquina monitorada, de forma independente e complementar ao sistema existente.



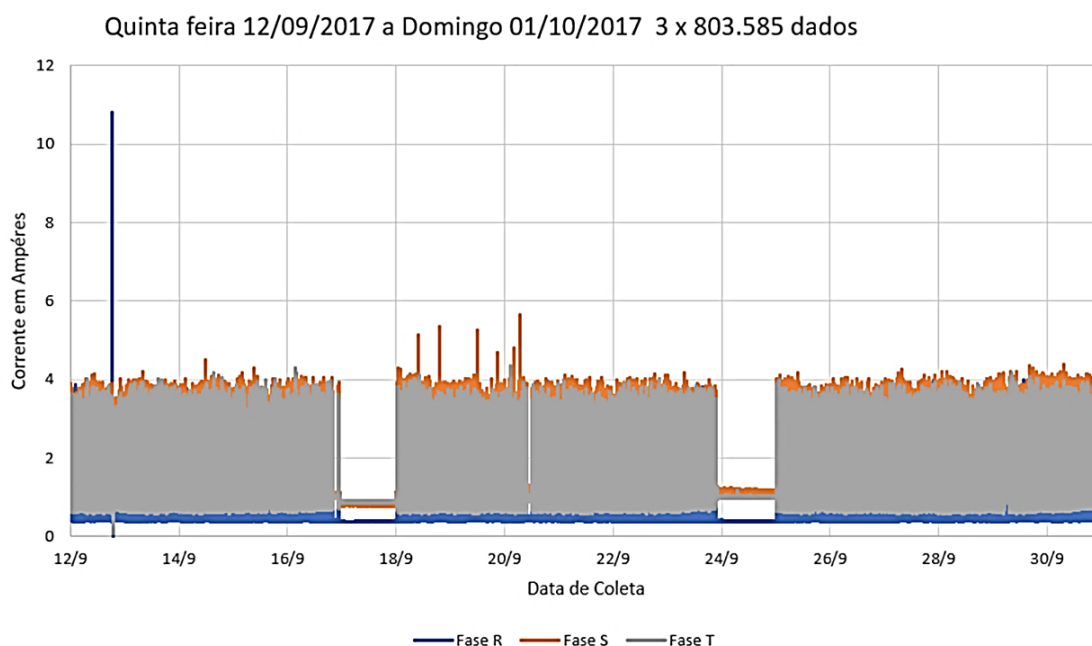
Figura 21 – Vista frontal do painel elétrico da estação de trabalho OP50-60.



## 4 RESULTADOS

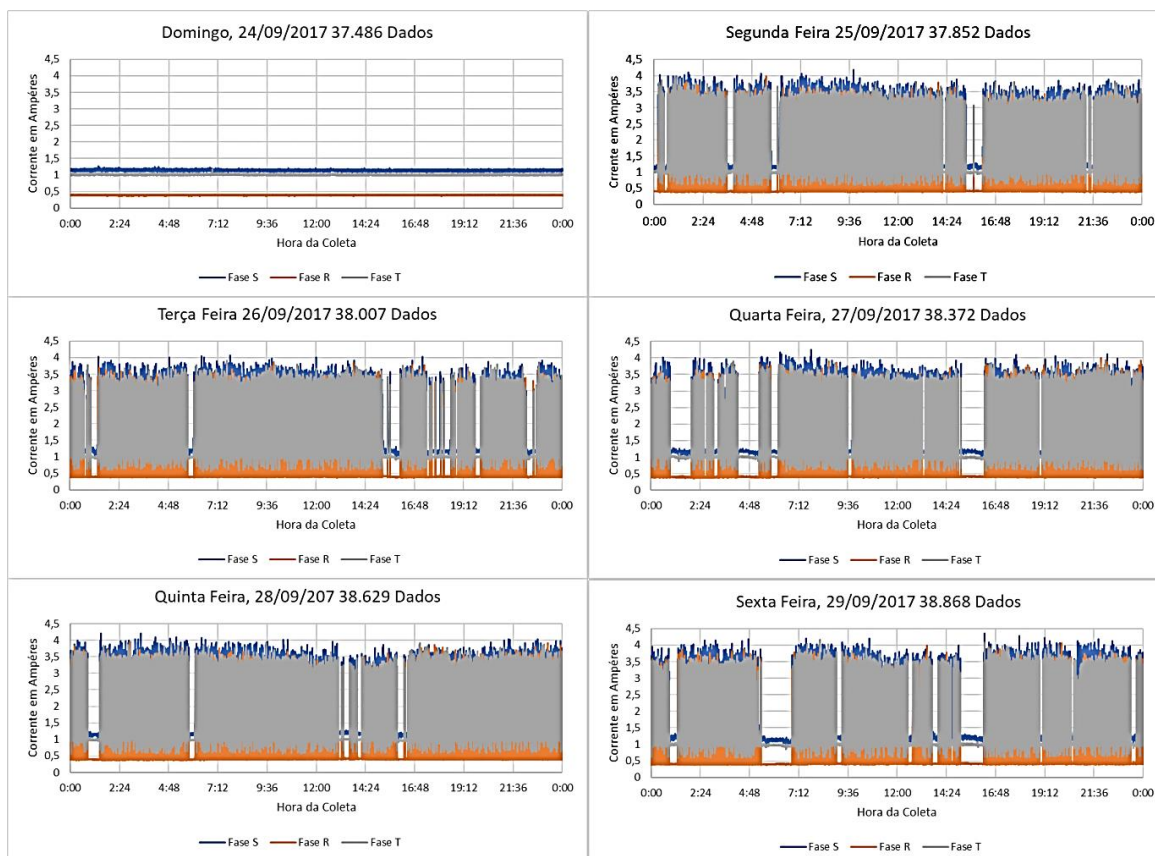
A Figura 22 apresenta os resultados de coleta de dados do consumo de corrente RMS trifásico, correspondente a 20 dias consecutivos de produção, da estação de trabalho OP 50-60. A linha azul representa o consumo de corrente da fase R, a linha laranja da fase S e a linha cinza da fase T. Pode-se observar que, de uma forma geral, a máquina monitorada opera de forma aparentemente ininterrupta durante os dias da semana, consumindo cerca de 4 amperes em cada fase, com ocorrências esparsas de valores de consumo acima desse valor típico, que podem ser investigados com maior detalhe. Nota-se ainda a parada de produção nos fins de semana, ocasião em que a corrente se reduz para valores abaixo de 1.3 A.

Figura 22 – Monitoramento do consumo de corrente durante vinte dias consecutivos.



Na Figura 23, mostram-se com mais detalhes os dados de medidas das correntes trifásicas capturados durante o intervalo de uma semana de monitoramento da estação de trabalho OP50-60. Observa-se que, com um grau de detalhe maior, revelam-se interrupções ocasionais e de curta duração durante as jornadas diárias de operação.

Figura 23 – Monitoramento do consumo de corrente durante uma semana.



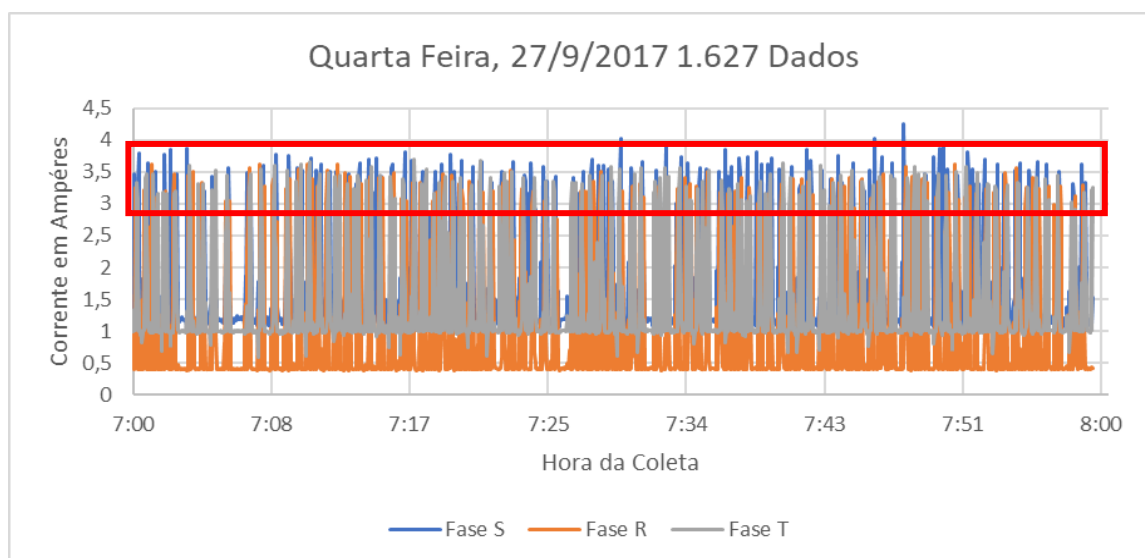
Com os dados mostrados na Figura 23, correspondentes a uma semana típica do mês de setembro de 2017, foi observada a existência de alguns padrões na amplitude da corrente trifásica RMS consumida pelo equipamento. O objetivo principal do monitoramento em ciclos longos (por exemplo, um dia ou uma semana) é a detecção destes padrões, para que não excedam um limite a ser definido, pois qualquer variação dos mesmos pode indicar alguma possível avaria no equipamento ou até mesmo alguma influência externa a ser monitorada.

Pode-se observar também que é possível gerenciar o ciclo produtivo da estação de trabalho OP50-60 através da análise do perfil de consumo de corrente. Na Figura 22 pode-se ver claramente o domingo sem produção, o horário de início da produção na segunda-feira a 01 hora da manhã, a parada da produção no sábado às 21 horas e as lacunas onde não há produção por algum motivo, como trocas de turno, refeições, avarias ou falta de matéria prima.

Pode-se notar que, em alguns sábados, o consumo de corrente diminui para valores inferiores a 1 ampere, em função do procedimento de redução de energia com o acionamento do sistema de emergência, onde ao final do turno de sábado, os operadores devem pressionar a botoeira de emergência de sua estação de trabalho, a fim de que desabilite alguns equipamentos internos, tais como os *drivers* de motores, bombas, dispositivos pneumáticos, que são equipamentos que ficam energizados a espera da operação da máquina. Quando o procedimento de redução de energia não é acionado, o consumo se reduz para valores acima de 1 ampere, particularmente nas fases S e T.

A Figura 24 apresenta em detalhe maior os dados de consumo durante o intervalo de 1 hora, evidenciando que a normalidade de operação do equipamento corresponde aos picos de consumo situados entre 3 e 4 ampères (faixa delimitada pelo retângulo vermelho), que corresponde ao funcionamento regular dos diversos componentes da máquina. Podem ocorrer casos esporádicos de picos de consumo acima dessa faixa de normalidade, que em se tratando de ocorrências pontuais, não caracterizam problemas a serem investigados.

Figura 24 – Consumo de corrente num intervalo de 1 hora de um dia típico.



Foi observado também que existe um padrão nas formas de onda das correntes trifásicas quando observadas com maior detalhe, tal como mostrado nos retângulos vermelhos das Figura 25 e 26. Observa-se um grupo de formas de onda que se repete a intervalos em torno de 40 segundos, correspondendo ao



ciclo de produção de uma peça ao ser processada na estação de trabalho OP50-60 (a linha MSG foi planejada para produzir 1 peça a cada 40 segundos). Embora o padrão de formas de onda não seja rigorosamente idêntico aos demais ciclos adjacentes (vide detalhe da Figura 25), pode-se perceber a existência de pequenos intervalos em que o nível de consumo de corrente que separa os referidos grupos torna-se mínimo e constante. Tais intervalos correspondem aos instantes em que a máquina cessa seus movimentos para troca da peça processada, ou devido a algum evento externo.

Figura 25 – Consumo de corrente num intervalo de 5 minutos de um dia típico.

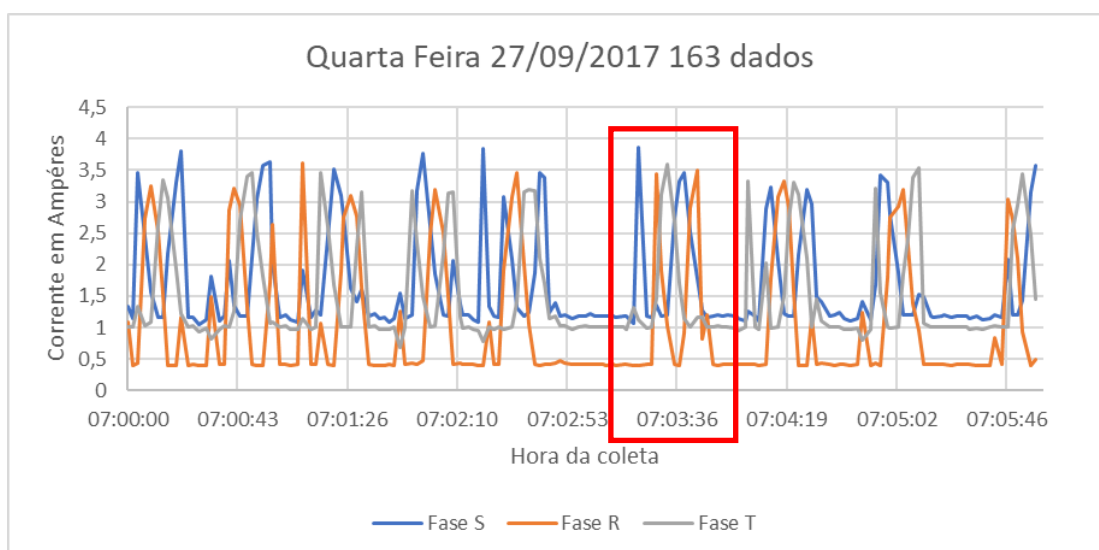
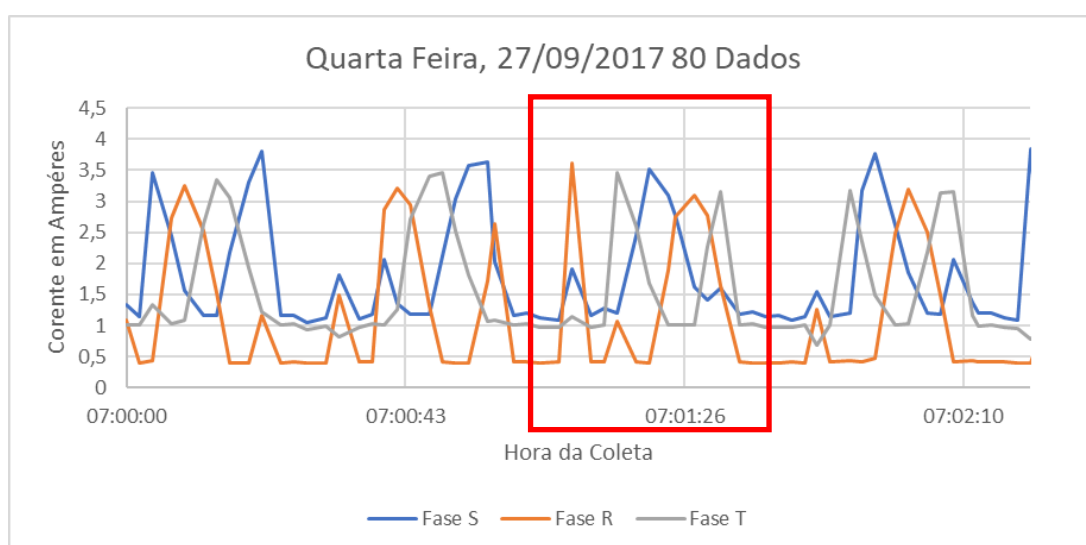


Figura 26 – Consumo de corrente num intervalo de 2 minutos de um dia típico.



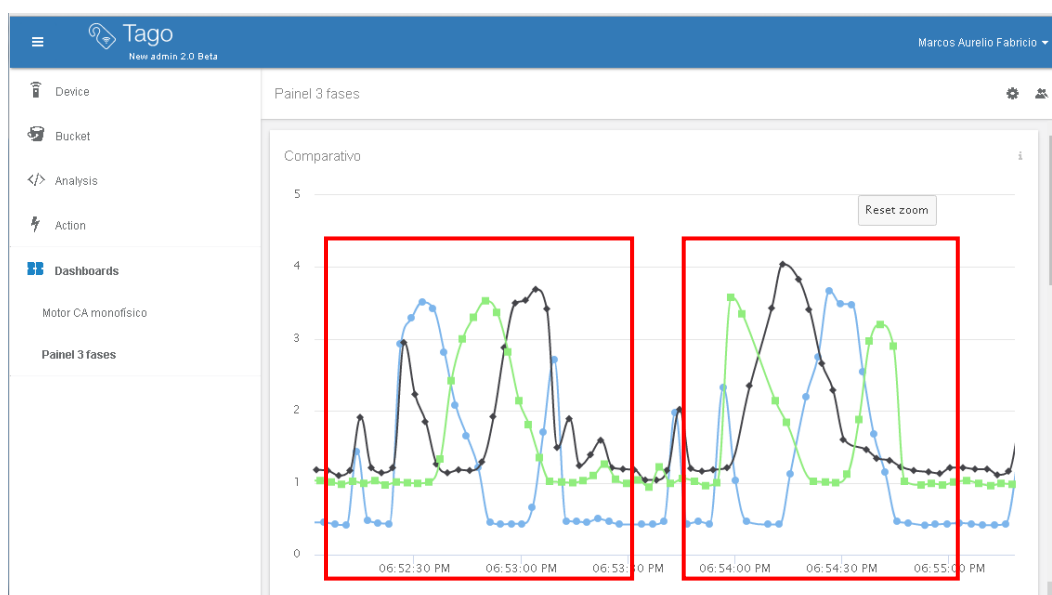
As figuras anteriores revelam a existência de um padrão nas formas de onda de corrente, visível no retângulo vermelho da Figura 26. Pode-se observar a

repetição desse padrão que se relaciona à atividade da máquina durante a produção de uma peça, e do intervalo entre duas produções seguidas.

A coleta dos dados apresentados nas Figura 22 a 26 é feita de forma automática utilizando o sistema de aquisição descrito no diagrama de blocos da Figura 11, que armazena a informação no banco de dados instalado no computador.

Os dados armazenados localmente podem ser enviados a aplicativos desenvolvidos especificamente para a aplicação de monitoramento, ou então disponíveis na web na forma de serviços de Internet das Coisas (IoT). Neste trabalho, optou-se pela utilização da Plataforma Tago (TAGO). Na Figura 27 mostra-se a tela de visualização do painel de controle (*dashboard*) da ferramenta Tago, acessada via internet, onde é apresentado o consumo de corrente registrado num intervalo de 2,5 minutos.

Figura 27 – Consumo de corrente registrado na ferramenta Tago.

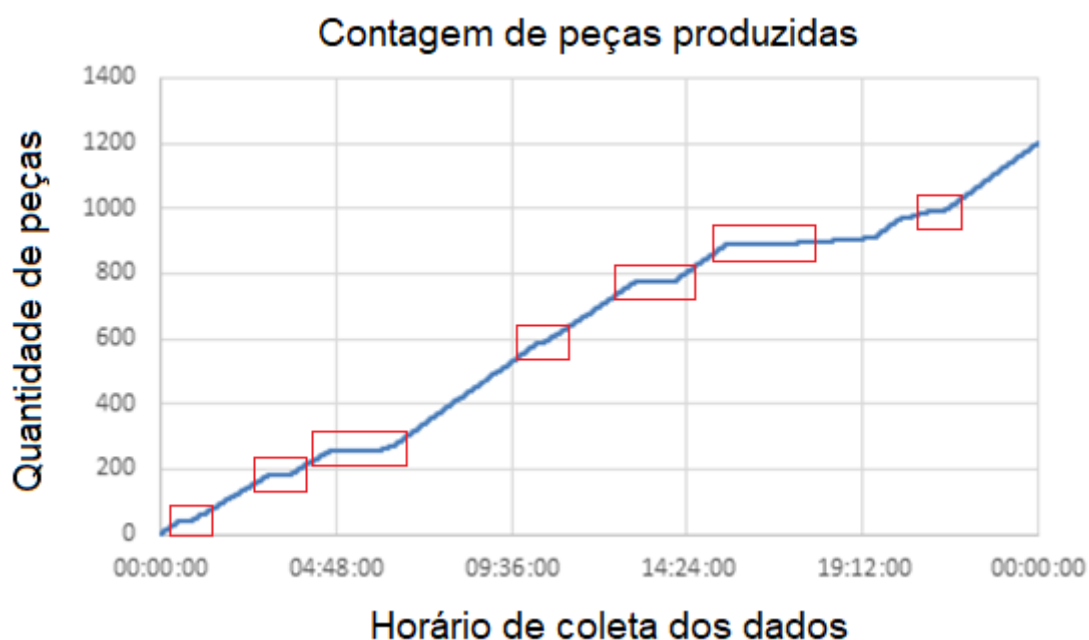


Observa-se a coerência dos dados coletados pelo sistema de medida junto à máquina (Figura 26) em relação aos mesmos dados armazenados na Plataforma Tago (Figura 27), demonstrando que o sistema confiável para utilização em aplicações de IoT, tais como a deste trabalho.

Os padrões de consumo das três correntes e os intervalos entre esses padrões sugerem a possibilidade de contabilizar a quantidade de peças

produzidas. A Figura 28 mostra a evolução da quantidade de peças produzidas em função do tempo, obtida a partir da contagem de sucessivos padrões de consumo de corrente.

Figura 28 – Controle produtivo através do comportamento de consumo



Os intervalos variáveis entre os padrões de corrente sugerem um tempo desperdiçado que poderia ser aproveitado para aumentar a produção. A quantidade de tempo presente nos intervalos pode sugerir estratégias ao responsável de produção para minimizar as perdas de tempo e maximizar a quantidade de peças produzidas.

A técnica de Análise de Assinatura de Corrente (MILJKOVIC,2015) normalmente faz uso da Transformada Discreta de Fourier para converter a informação dos valores de corrente em função do tempo (ou seja, sua forma de onda), amostrados a uma taxa constante, para o domínio da frequência. O objetivo dessa transformação é o reconhecimento de padrões de componentes de frequência que estejam presentes no sinal em função do tempo. A Figura 29 mostra um intervalo de 1000 dados sequenciais das correntes alternadas medidas, correspondentes a 27 minutos de captura, que aparentam certa regularidade quanto aos padrões temporais similares aos das Figura 22 a 26. Estes dados foram submetidos a um processo de janelamento, utilizando a janela

de *Blackman*, para suavizar os efeitos de truncamento dos dados no início e no fim do intervalo (Figura 30), e em seguida procedeu-se ao cálculo de DFT (SMITH).

Figura 29 – Trecho de amostras coletadas durante um intervalo de 27 minutos.

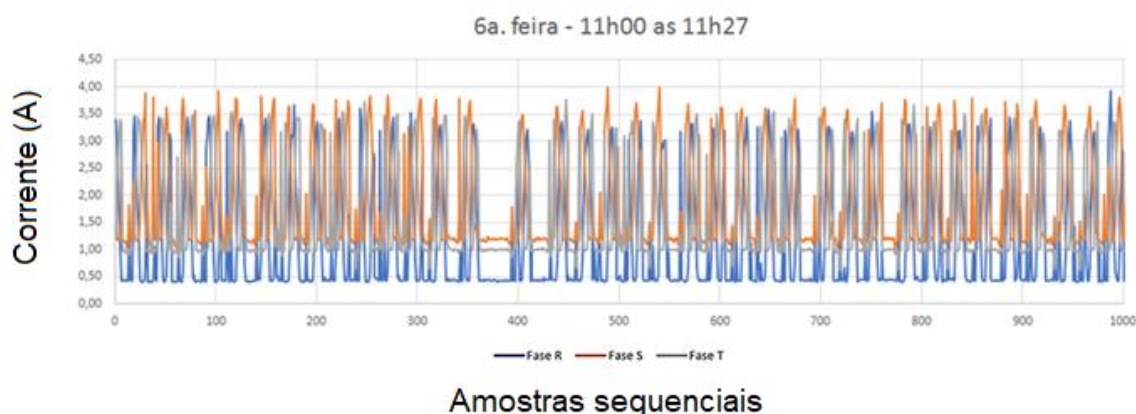
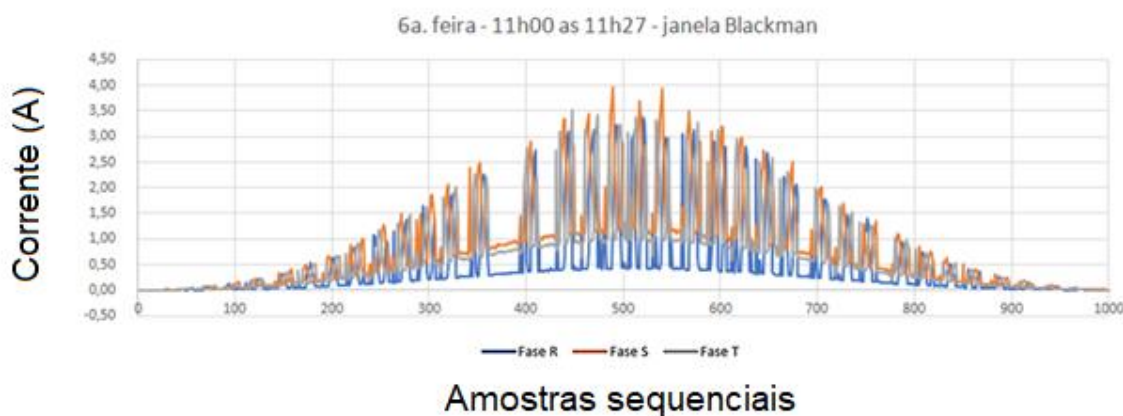
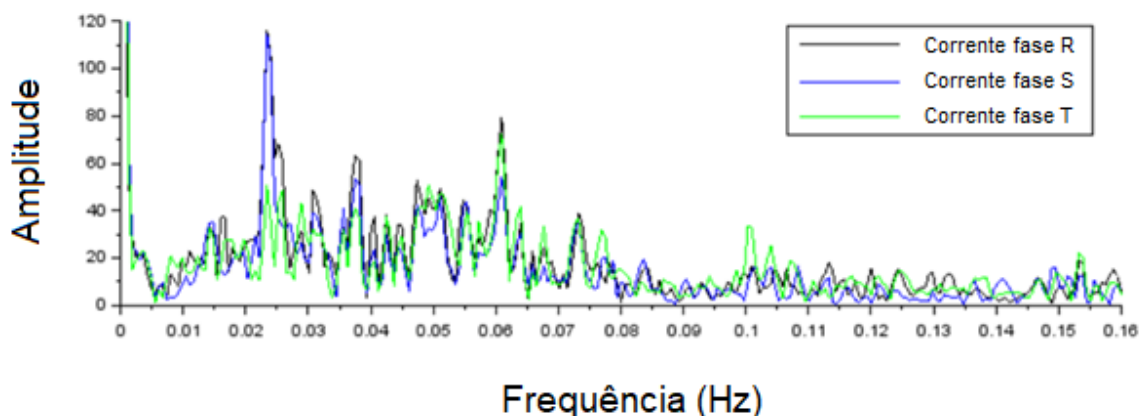


Figura 30 – Trecho de amostras submetidas ao janelamento de *Blackman*.



A Figura 31 ilustra o gráfico de amplitude em função da frequência correspondente aos dados temporais da Figura 29. Pode-se perceber claramente a existência de uma raia de grande amplitude próxima à frequência de 0,025Hz, que corresponde a um evento periódico de aproximadamente 40 segundos, ou seja, coincide com o ciclo de produção médio da máquina. Devido ao alto grau de regularidade do padrão repetitivo das formas de onda de corrente nesse trecho de informação, o espectro de frequências revela uma raia única predominante.

Figura 31 – Espectro de frequências do sinal da Figura 30.



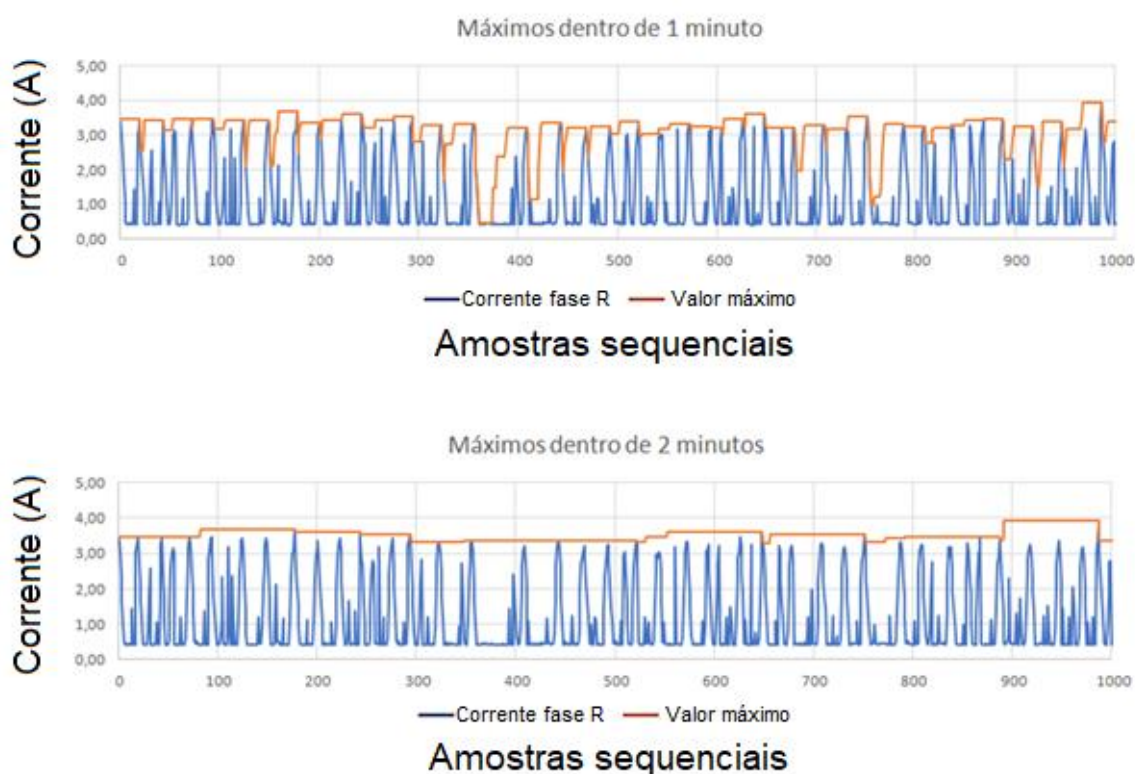
Embora não seja uma abordagem usual para a técnica de análise de assinatura, regularidades no domínio do tempo também podem ser entendidas com “assinaturas”. Nos detalhes das Figura 24 e 26, observa-se que os picos de consumo de corrente RMS não são absolutamente de mesma intensidade, porém estão dentro de uma faixa de valores. A forma de onda em cor laranja, por exemplo, sempre se situa entre 3 e 4 ampères. É possível, portanto, realizar uma análise dos dados das séries temporais para detectar a ocorrência dessa propriedade, e dessa forma concluir pela operação correta e saudável da máquina sob monitoramento.

A Figura 32 mostra o resultado do cálculo da detecção do valor máximo de corrente de uma lista de amostras, com janelas de 1 minuto e 2 minutos. O objetivo dessa análise é verificar que todos os valores máximos da forma de onda dentro de um intervalo de tempo especificado estão ocorrendo dentro de uma faixa de normalidade de 3 a 4 amperes, por exemplo. Para o caso de uma janela de 1 minuto, o cálculo resulta num perfil com muita variação (linha em cor laranja), mas para janelas de 2 minutos ou mais, o perfil torna-se mais estável e representativo da detecção dos valores máximos dentro de um intervalo.

Caso a cadência de operação da máquina se reduza, abrindo intervalos sem atividade entre os padrões repetitivos, o perfil da detecção dos máximos deverá diminuir abaixo de 3 ampères, e esse acontecimento não é necessariamente um problema. Entretanto, se o valor máximo ultrapassar a faixa

de normalidade e se estabilizar numa nova faixa de valores acima, esse evento poderá estar relacionado a alguma anormalidade no consumo de corrente, tal como perda de isolamento elétrica de algum motor, aumento de carga, anomalia mecânica em rolamentos e engrenagens, etc.

Figura 32 – Detecção de máximos de corrente dentro de uma faixa de normalidade.



A estratégia de detecção de máximos em intervalos de tempo mostrada na Figura 32 serviu de base à implementação de um algoritmo adicional a ser incorporado no aplicativo Python SW2 da Figura 11, com o objetivo de processar os dados de corrente armazenados no banco de dados. O processo de detecção dos valores máximos das correntes medidas foi ajustado para uma janela de 5 minutos, ou seja, obtém-se o valor máximo de corrente representativo de um intervalo de 5 minutos. Com base nesses valores, são realizadas comparações com limites pré-definidos para determinação de propriedades do estado de operação da máquina. Os limites de classificação usados nas comparações estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos valores de corrente

LIMITES DE CLASSIFICAÇÃO		
TIPO DE OPERAÇÃO	FUNCIONANDO	$I \geq 2,5 \text{ A}$
	PARADO	$1.0\text{A} \leq I < 2.5\text{A}$
	EMERGENCIA	$0.5\text{A} \leq I < 1.0\text{A}$
	DESLIGADO	$I < 0.5\text{A}$
ESTADO DE OPERAÇÃO	NORMAL	$I \leq 4.3\text{A}$
	ALERTA	$4.3\text{A} < I < 10\text{A}$
	OUTLIER	$I \geq 10 \text{ A}$

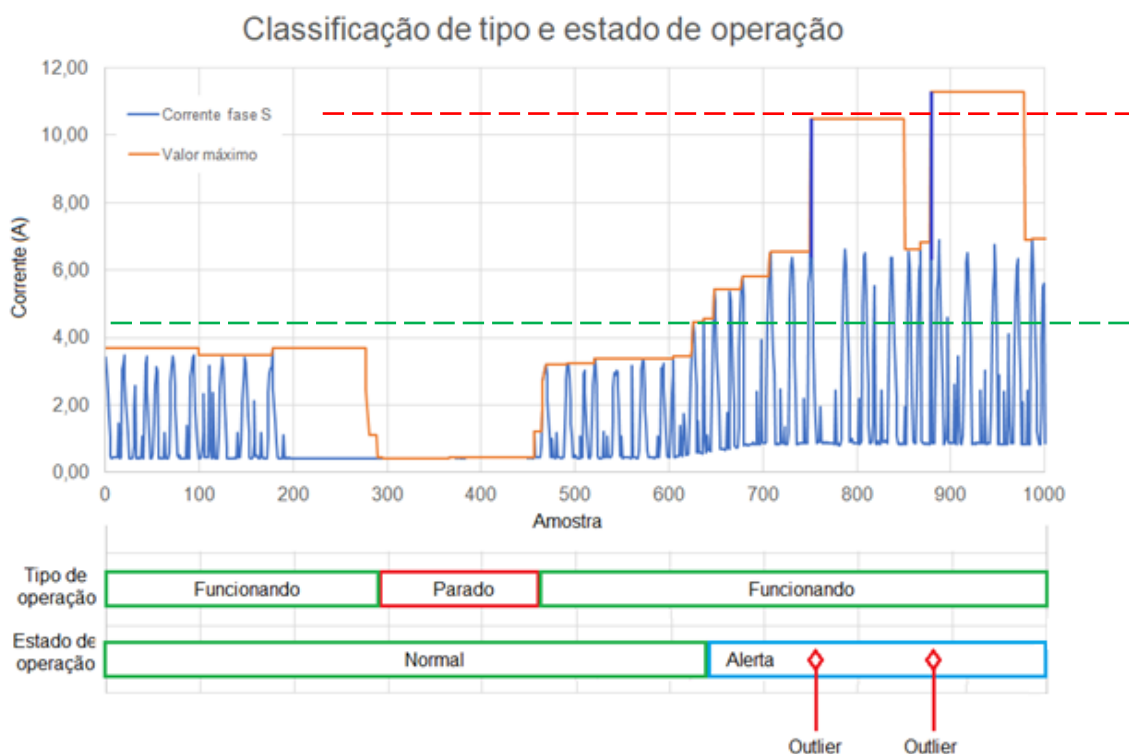
Com base nos dados armazenados no banco de dados, posteriormente processados pelo aplicativo Python SW2 e transmitidos para a Plataforma Tago, foi possível criar uma tela de visualização (*dashboard*) específica para monitorar de uma forma simples o *status* da máquina, composto pelo tipo de operação em curso e pelo estado de operação da máquina.

A Figura 33 ilustra graficamente como as comparações da Tabela 3 são aplicadas aos dados reais de consumo de corrente, demonstrando como as variações de valor causam as modificações do tipo de operação e do estado de operação. No exemplo da Figura 33, foi utilizada a título de exemplo uma janela de 100 amostras para determinação do valor máximo, fato que determina uma latência equivalente em algumas mudanças de estado. Por exemplo, para se determinar que a máquina esteja “parada”, a respectiva condição deve se estabelecer e permanecer estável durante um intervalo de pelo menos 100 amostras. O retorno ao estado “funcionando” ocorre imediatamente, tão logo ocorra um valor de corrente acima da faixa determinante de “parada”. A mesma análise se aplica às demais variáveis de estado.

É esperado que, em condições normais, a detecção de um estado “*outlier*” seja uma ocorrência esporádica, isolada e pontual. Caso se estabeleça uma taxa de ocorrência mais frequente, ou um estado contínuo “*outlier*”, o sistema monitoramento deve diagnosticar um estado de sobrecorrente ou possível curto-circuito, e as proteções naturais da máquina ou da instalação de energia elétrica associada entrarão em ação para o seu desligamento.



Figura 33 – Exemplo de classificação do tipo e estado de operação.



O esquema de classificação do valor do consumo de corrente, descrito na Tabela 2 e na Figura 33, constitui um pré-processamento executado no aplicativo SW2 do diagrama de blocos da Figura 11. O valor das variáveis “Tipo de operação” e “Estado de operação”, resultados dessa classificação, são transmitidos para a plataforma Tago para pós-processamento, visualização e geração de alertas e notificações. Na sequência de figuras a seguir (Figura 34 a 42), apresentam-se as formas de visualização desenvolvidas neste trabalho, que estão disponíveis aos usuários através de painéis na plataforma Tago, acessíveis via internet.

Na Figura 34, é mostrado o equipamento funcionando em estado normal. A Figura 35 ilustra um caso em que é possível identificar que a máquina está parada, pois foi detectado valor de corrente entre 1,0 e 2,5 amperes durante pelo menos 5 minutos. Essa condição pode estar associada à ausência do operador (horários de descanso, pausa, refeições ou parada programada), por falta de matéria prima ou pela interrupção de operação da linha de produção numa estação à frente.



Figura 34 – Painel de controle indicando máquina funcionando em estado normal.

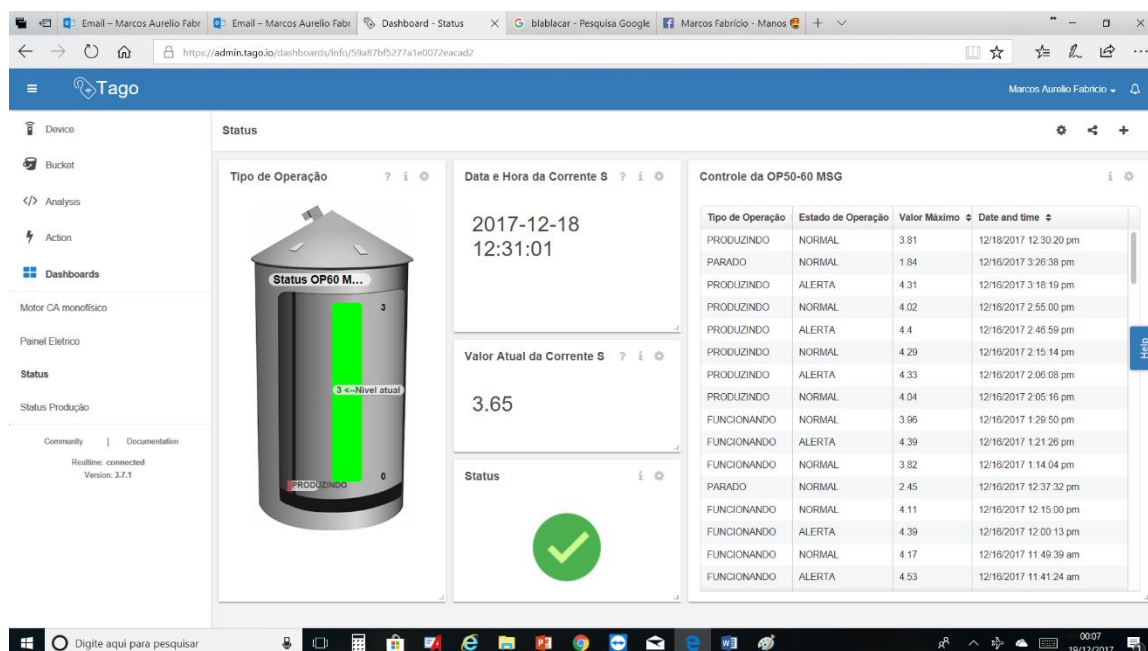
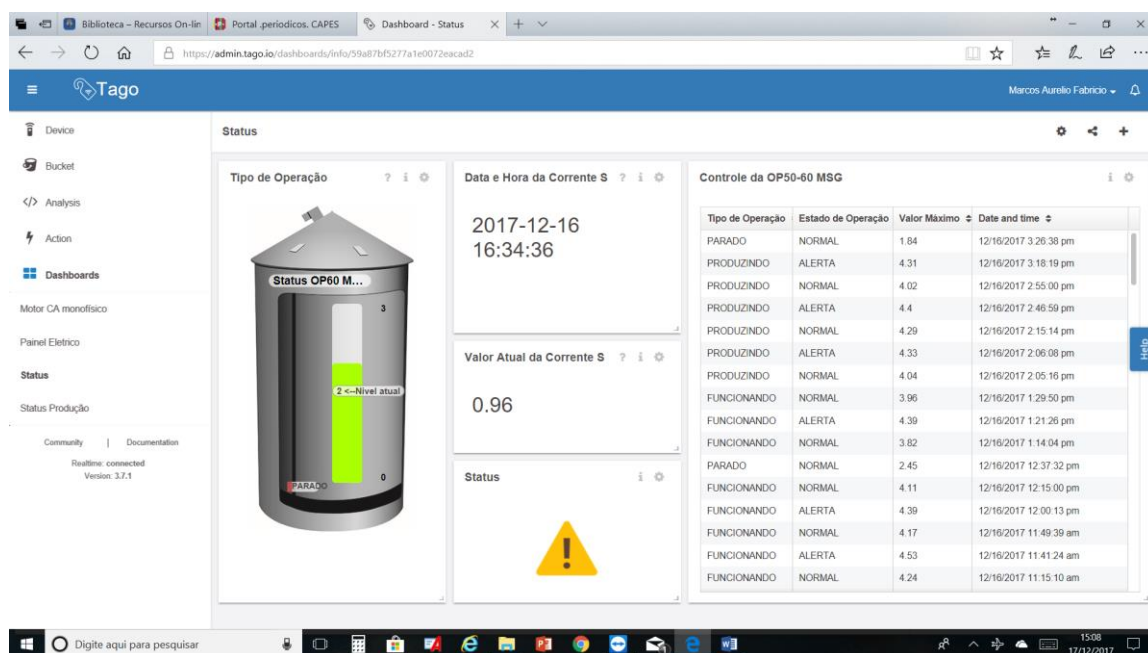
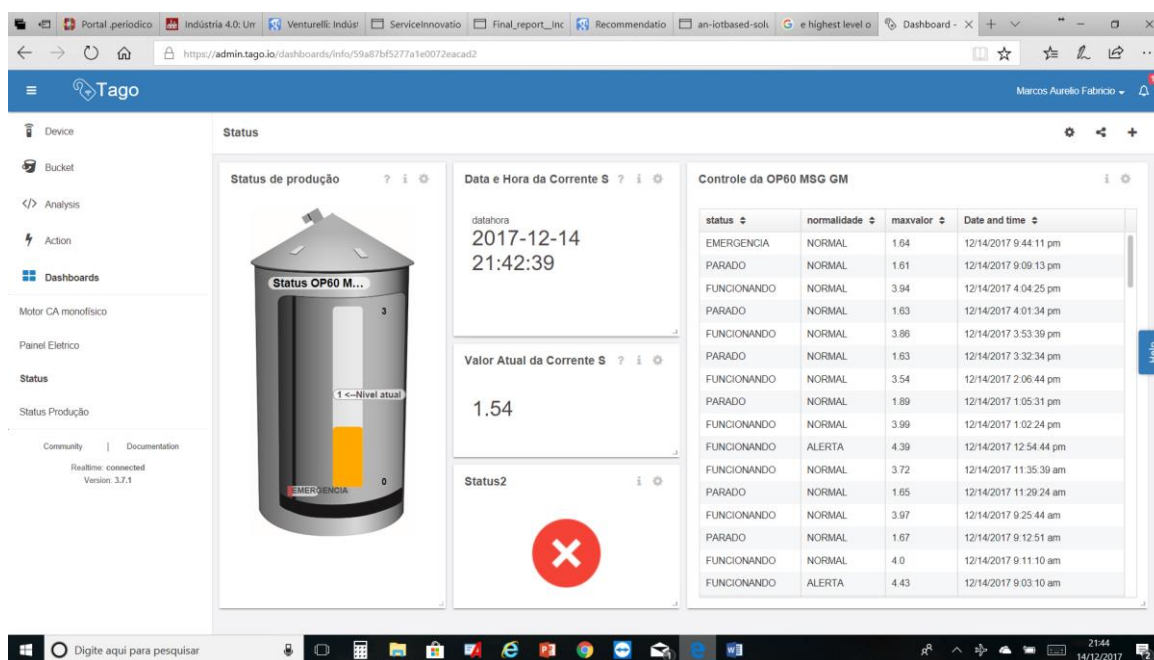


Figura 35 – Painel de controle indicando máquina parada em estado normal.



Quando se faz necessário uma parada de emergência, seja pelo risco de acidente ou pelo simples fato de economia de energia, o sistema de monitoramento apresenta a situação apresentada na Figura 36 após 5 minutos em que o valor da corrente esteja na faixa entre 0,5 e 1,0 ampere.

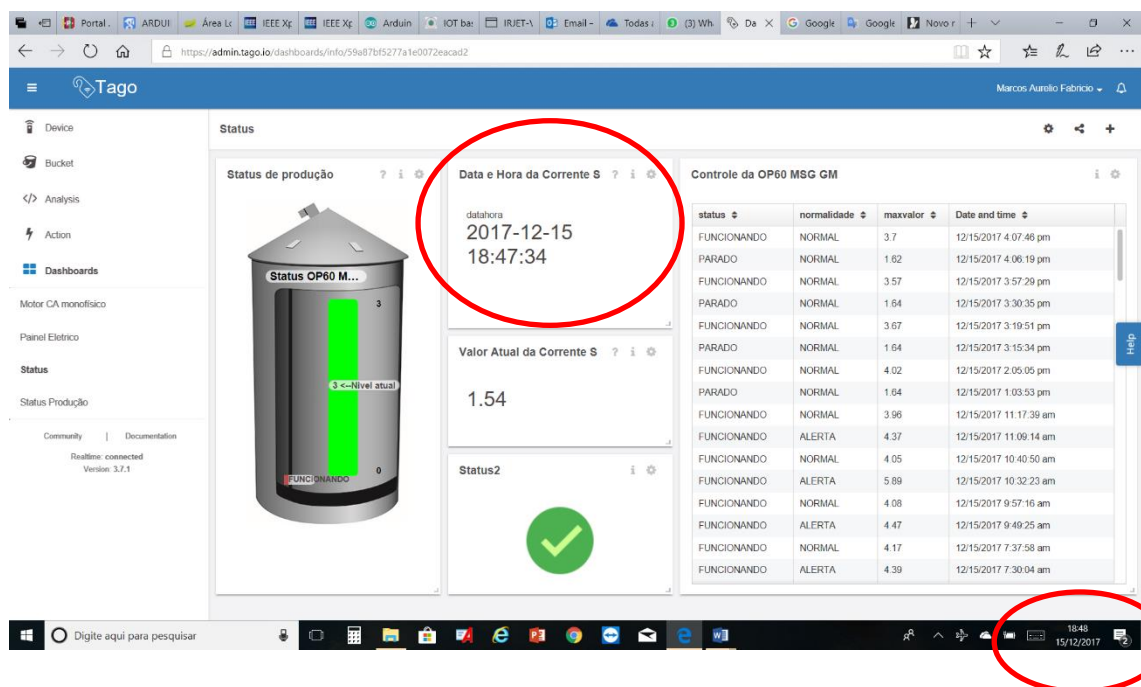
Figura 36 – Painel de controle indicando máquina em emergência, estado normal.



Em todos os painéis de controle da plataforma Tago existem também informações que orientam o usuário quanto ao valor de corrente e data e hora do último dado recebido, que permite uma rápida avaliação de que o sistema esteja operando corretamente, não existindo um problema de conexão com a internet ou um problema com o *hardware* ou *software* do equipamento no local instalado. A

Figura 37 mostra nas elipses vermelhas os locais onde se encontram esta informação, que deve estar sempre próxima à hora atual do computador.

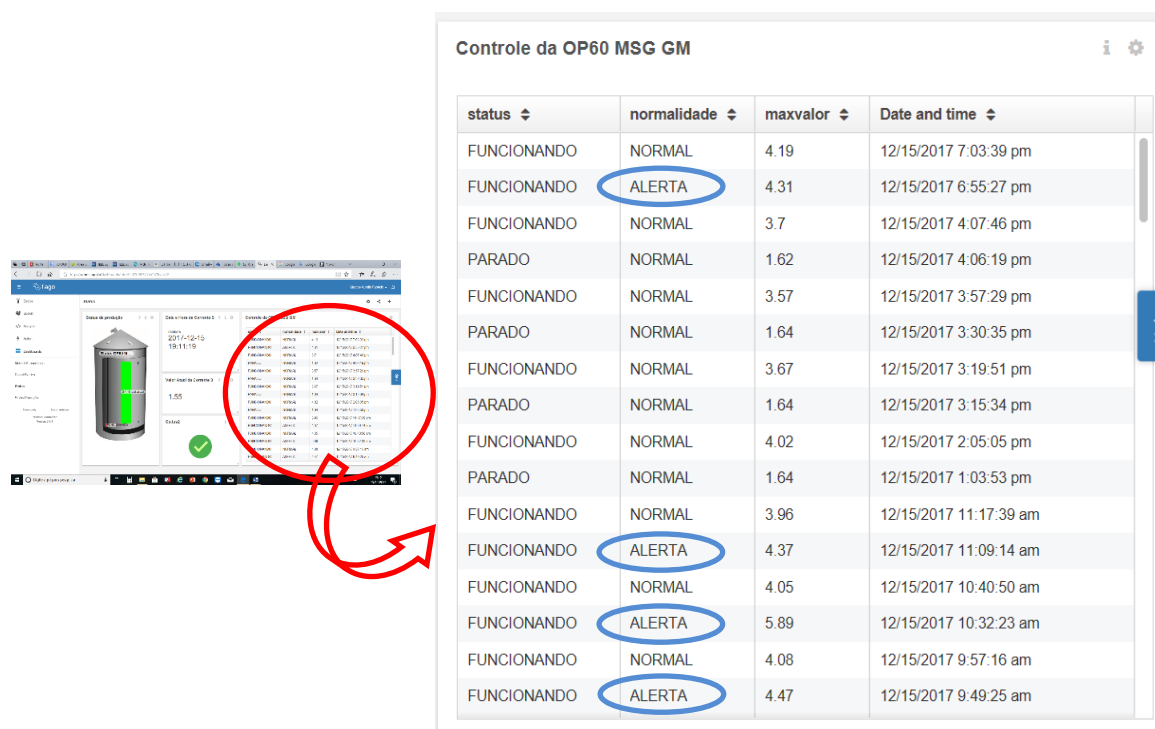
Figura 37 – Painel de controle exibindo informações atuais do equipamento OP50-60



Observando a tabela ao lado no mesmo painel de controle, tem-se uma sumarização com alguns dados para gestão da manutenção e produção, também em tempo praticamente real, onde o usuário define o histórico a observar, tal como mostrado na Figura 38. É possível observar se a máquina está funcionando com consumo normal (estado “normal”), ou verificar quantidade de alertas que ocorreram (estado “alerta”), ou se aconteceu algum valor muito acima do normal (estado “outlier”), todas essas possibilidades associadas ao valor máximo da corrente durante o período que a máquina está energizada.

Na Figura 38, caso a quantidade de “alertas” seja muito grande, ou se tornar um estado contínuo, isso seria um indicativo de que houve alguma alteração funcional na máquina monitorada digna de investigação, que possa ser precursora de uma futura avaria ou falha que cause a interrupção de operação.

Figura 38 – Detalhe do painel de controle



Ao de selecionar o *dashboard* denominado “Painel Elétrico” na plataforma, é possível acompanhar as formas de onda das correntes elétricas recebidas, bem como os valores máximos para que o gestor de manutenção possa acompanhar de perto como está o equipamento. A Figura 39 exemplifica um *dashboard* referente à corrente da fase S e seu respectivo valor máximo.

Já para um gestor de produção, é possível verificar graficamente os horários de ociosidade do equipamento, em tempo real, bem como seu histórico, tal como exibido na Figura 40, onde o nível 0 representa a máquina desligada, sem energia, o nível 1 representa máquina em emergência, o nível 2 representa que a máquina está parada (por exemplo, aguardando matéria prima) e o nível 3, nível máximo, representa que a máquina está produzindo normalmente.

Figura 39 – *Dashboard* Painel Elétrico para corrente da fase S.

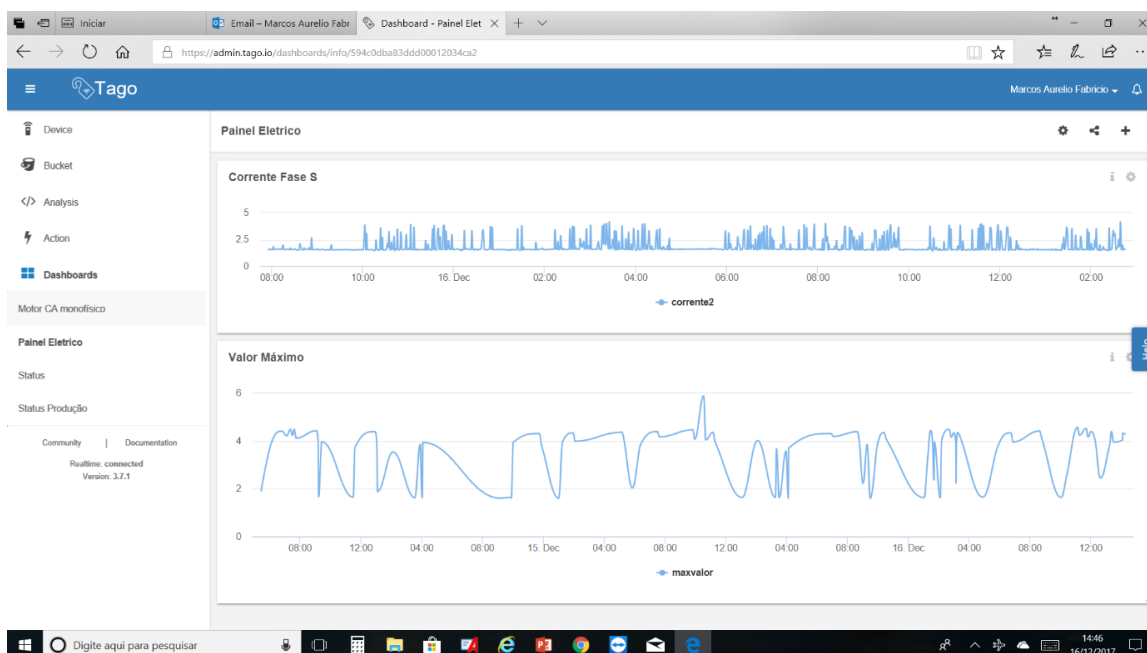


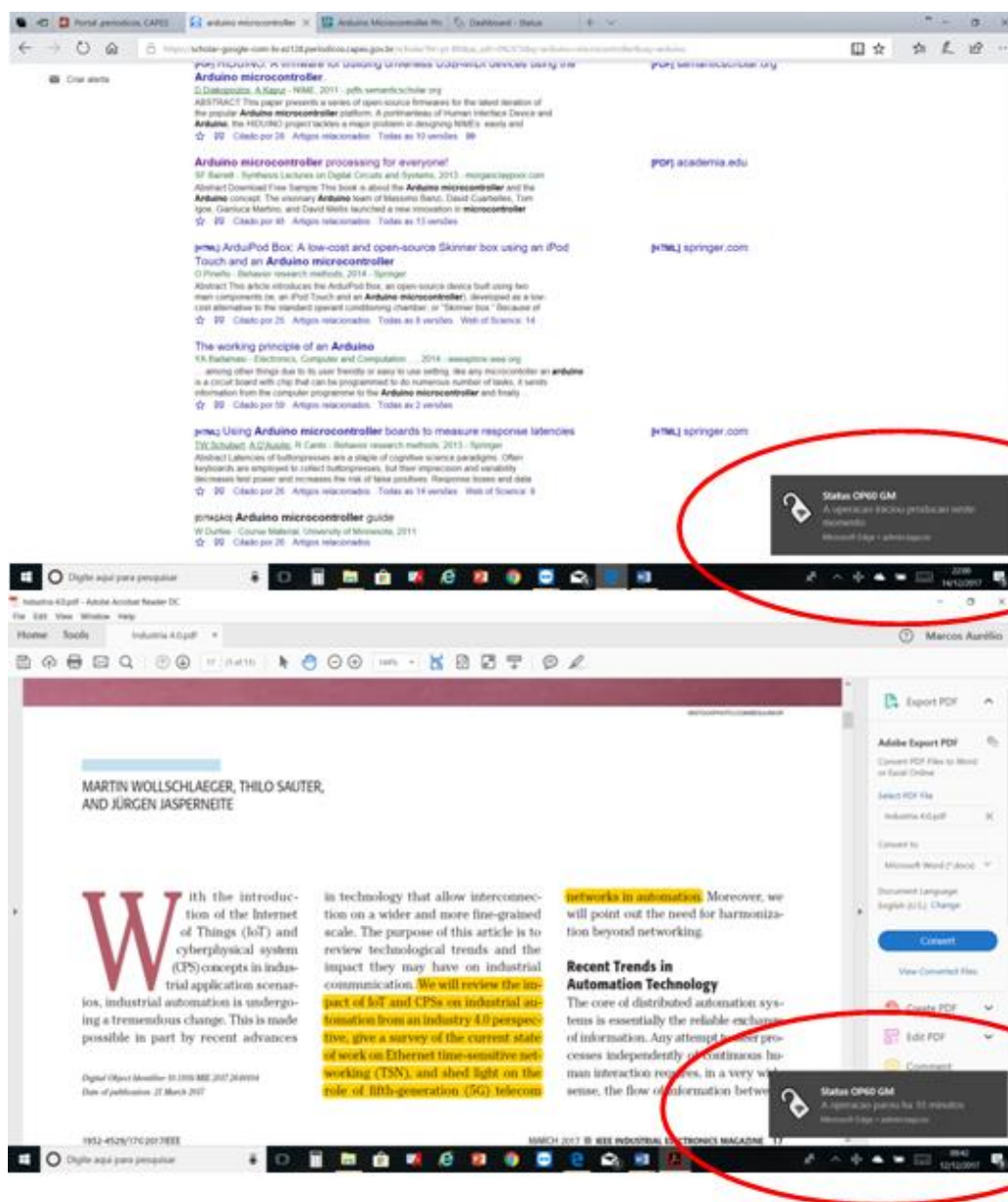
Figura 40 – Painel de controle exibindo informações para gestão da produção.



Estando a página da plataforma Tago ativa no *browser* de navegação do computador pelo qual se acessa e observa o Painel de Controle da aplicação de monitoramento OP50-60, o usuário pode receber notificações do *status* da máquina, em tempo real, como mostra a Figura 41, mesmo que esteja visualizando outras páginas web. A plataforma Tago permite a criação de

notificações (*tile notifications*), que são escritas em linguagem Node.JS, e são disparadas a cada transição de status da máquina.

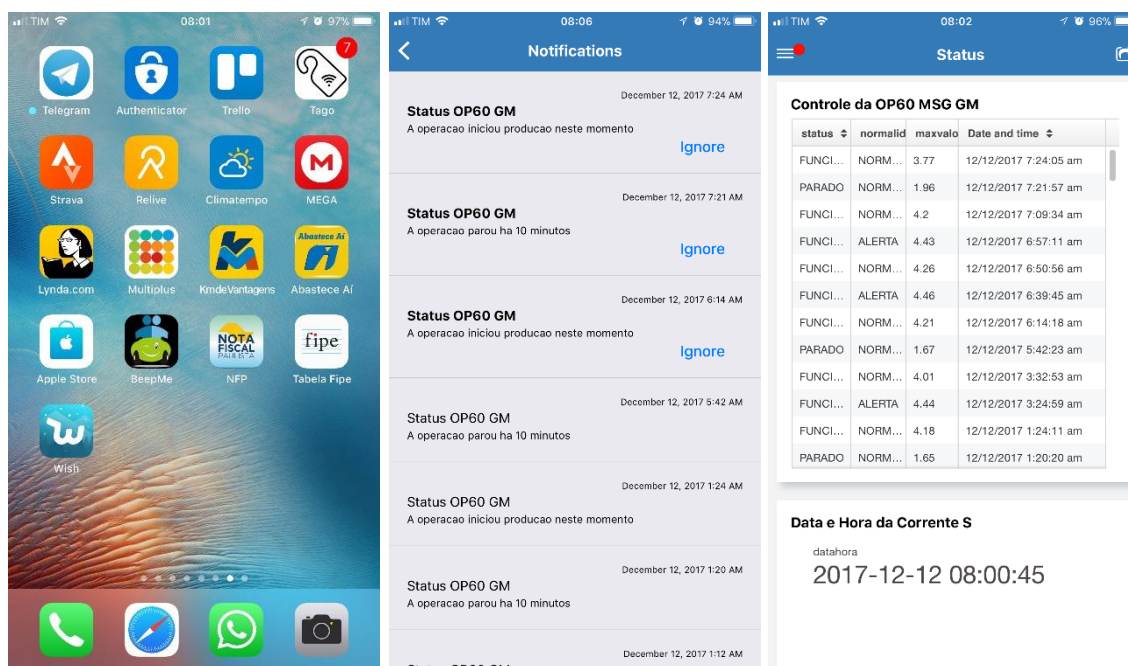
Figura 41 – Exibição de notificações no *browser* utilizado para visualização da aplicação.



Todas as funcionalidades visualizadas nas Figura 34 a 41 também podem ser visualizadas em um *smartphone*, como demonstrado na Figura 42. Estas informações produzem notificações *push* em tempo praticamente real para os usuários que possuírem o aplicativo Tago instalado, que podem tomar decisões de intervenção no processo produtivo de forma remota.



Figura 42 – Visualização do painel de controle de monitoramento em um Smartphone.



## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de um sistema de monitoramento de equipamentos elétricos de uma linha de produção, visando o acompanhamento do estado de operação de um equipamento, em tempo real, com possibilidade de detecção de anomalias operacionais e falhas.

O sistema de monitoramento utiliza uma arquitetura de rede de sensores que pode ser cabeada ou sem fio (RSSF), transmitindo os dados coletados primeiramente a um módulo concentrador, para armazenamento em um banco de dados local e pré-processamento, e num segundo momento a aplicativos acessíveis via internet, para pós-processamento.

Um estudo de caso foi elaborado, utilizando uma linha de produção real, na qual uma estação de trabalho escolhida como objeto de estudo teve o seu consumo de corrente elétrica eficaz (RMS) monitorado em tempo real, amostrados a uma taxa de 1 amostra a cada 1,58 segundos. Os dados de corrente foram analisados, visando o acompanhamento do estado de operação da máquina e a detecção de desvios que estejam correlacionados a processos degenerativos que resultem em falhas.

O sistema de monitoramento foi concebido para realizar medidas trifásicas no painel de controle da estação de trabalho OP50-60 de uma linha de produção de peças e partes automotivas, de forma não invasiva. Os dados foram capturados e tratados num computador local dedicado à aplicação, operando como um módulo concentrador de dados, e comunicados via internet a uma plataforma de IoT para permitir o acesso remoto pelos usuários envolvidos no contexto da aplicação e responsáveis pela gestão das informações.

Os dados de consumo de corrente são aparentemente repetitivos e monótonos quando avaliados em períodos de longo prazo. A quantidade de dados armazenados no banco de dados local pode atingir 1 Mbyte por dia para cada máquina monitorada, indicando claramente a necessidade de um pré-processamento para sua redução, considerando os requisitos da aplicação em vista. Neste trabalho, optou-se pela classificação dos dados de consumo de



corrente em faixas de valores, e a respectiva associação aos estados de operação.

Foi proposta a classificação em duas classes, segundo o Tipo de Operação (funcionando, parado, emergência e desligado), que caracteriza como a máquina está operando em função da corrente monitorada, e segundo o Estado de Operação (normal, alerta e *outlier*), que avalia se o valor da corrente consumida está numa faixa de normalidade ou se apresenta indícios de alguma anomalia em curso.

As informações pré-processadas foram transmitidas a uma plataforma de IoT que provê armazenamento em nuvem e ferramentas para visualização e pós-processamento. A escolha da plataforma Tago se deveu a facilidade de utilização e à disponibilidade de suporte por parte de seus desenvolvedores, que colaboraram em diversas partes do desenvolvimento. Essa plataforma se mostrou adequada à criação de diversos painéis de visualização que apresentam informação sobre o *status* de operação da máquina monitorada aos usuários de interesse (gestor de manutenção, gestor de produção, encarregado de operação, etc).

Os resultados obtidos foram consistentes e demonstram claramente que um sistema de monitoramento de condição (CM), tal como o que foi desenvolvido, provê a base para uma aplicação de gestão de operação e de manutenção de equipamentos industriais. Também confirmam a possibilidade de monitoramento da atividade de uma máquina através de aplicativos de IoT, que permitem o acesso às informações via internet, através de computadores remotos ou dispositivos móveis, aderente, portanto, ao contexto de Internet das Coisas.

De uma forma prática, este trabalho, inclusive, demonstra aplicabilidade na direção da iniciativa da Indústria 4.0. Indústrias que ainda estejam no nível da 3ª Revolução Industrial normalmente possuem um conjunto heterogêneo de máquinas, algumas bastante modernas e altamente automatizadas, e outras antigas e robustas, com mais de 30 anos de atividade produtiva, que carecem de um mínimo de monitoramento de suas variáveis operacionais. Portanto, o sistema de monitoramento ora proposto permite prover um mínimo de automação em máquinas antigas e abre a possibilidade de

monitoramento independente, paralelo e não intrusivo em máquinas que já contam com um sistema supervisório moderno. Uma indústria que atinja o objetivo de tornar o conjunto de seus equipamentos produtivos totalmente monitorado consolida as características da 3ª Revolução Industrial e se credencia para dar o próximo passo rumo a Indústria 4.0.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta enseja diversas oportunidades de trabalhos futuros, em continuação, para aperfeiçoamento ou complementação ao tema aqui desenvolvido.

- Desenvolvimento de um módulo de aquisição de dados com maior poder computacional, que necessitaria de um *hardware* com maior capacidade, de modo a permitir a coleta de dados com uma maior taxa de amostragem e, através da DFT, poder avaliar frequências harmônicas na faixa de 0 a 1,5 kHz. Dessa forma, o pré-processamento realizado no módulo MCD pode ser ampliado para a detecção de assinaturas de corrente no domínio da frequência, e assim implementar o Método de Extração de Características descrito na seção 2.1.
- Reelaborar o software de tratamento de dados para ampliar a captura de dados relacionados à produção, tais como tempo ocioso, consumo real de energia por produto produzido e em *stand by*.
- Armazenar o histórico de consumo de corrente elétrica durante um longo período até a ocorrência de uma falha real do equipamento, e com isto gerar dados de manutenção preditiva.
- Criar um tipo específico de notificação que informe periodicamente a saúde do equipamento monitorado para o gestor de manutenção.
- Ampliar o sistema de monitoramento para a captura de dados de diversas máquinas simultaneamente, para analisar os impactos dessa organização nos diversos componentes do sistema.

## REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, Ian F. et al. *Wireless sensor networks: a survey*. Computer networks, Atlanta, v.38, n.4, p.393-422, 2002. Available from: <<http://www.ee.oulu.fi/~carlos/WSN Papers/AK02.pdf>>. Cited: 19 Feb. 2018.
- ARDUINO What is Arduino? Available from: < <https://www.arduino.cc/>>. Cited: 19 Feb. 2018.
- AZZINI, H. A. D. et al. *Rede de Sensores para Monitoramento e Gerenciamento de Cargas Residenciais com Interface para Internet*. XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, CBA 2016, Vitória, ES. Disponível em:< <https://www.escavador.com/sobre/4917124/hader-aguiar-dias-azzini>>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- BARBOSA, G. F.; AROCA, R. V. *An IoT-Based Solution for Control and Monitoring of Additive Manufacturing Processes*. In: J. POWDER METALL MIN, v.6, n. 158, p.2, 2017. Available from: < <https://www.omicsonline.org/open-access/an-iotbased-solution-for-control-and-monitoring-of-dditivemanufacturing-processes-2168-9806-1000158.php?aid=86466>>. Cited: 19 Feb. 2018.
- BEHRENS, F.H. *Estudo e implementação de métodos de automação, controle e gestão de processos e serviços utilizando a “Internet das Coisas”*. Fev. 2016 a jan. 2018. 20f. Mestrado (profissional) – Programa de Pós-Graduação em Engenharias IV, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em:<://www.escavador.com/sobre/1171448/frank-herman-behrens>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- BRANQUINHO, C. O. *Teoria do Radiuino*. Maio 2015. Disponível em: <<http://radiuino.cc/blog/>>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- EREN, L.; AŞKAR, M.; DEVANEY, M. J. *Motor current signature analysis via four-channel FIR filter banks*. *Measurement*, v. 89, p. 322-327, 2016. Available from: <<https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/motor-current-signature-analysis-via-four-channel-fir-filter-banks-E6PcRaDZoe>>. Cited: 19 Feb. 2018.
- FRIENDS, Apache. *XAMPP Apache+ MySQL+ PHP+ Perl*. Apache Friends. 2014. Available from: <<http://www.oldapps.com/xampp.php>>. Cited: 19 Feb. 2018.
- GOYAL, Deepam; PABLA, B. S. *Condition based maintenance of machine tools— A review*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 10, p.24-35, 2015. Available from:< <https://plu.mx/plum/a/?doi=10.1016%2Fj.cirpj.2015.05.004>>. Cited: 19 Feb. 2018.
- GUBBI, Jayavardhana, et al. *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. *FUTURE GENERATION COMPUTER SYSTEMS*, v.29, n. 7, p. 1645-1660, 2013. Available from: < <http://www.buyya.com/papers/Internet-of-Things-Vision-Future2013.pdf>>. Cited: 19 Feb. 2018.

HAN, Y.; SONG, Y. H. *Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY. v. 18, n. 1, p. 4-13, 2003. Available from:

<<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1159890/?reload=true>>.

Cited: 19 Feb. 2018.

IBM. *Resolva problemas reais com o IBM Cloud*. Disponível em: <<https://www.ibm.com/cloud-computing/bluemix/pt>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

KAGERMANN, Henning, et al. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the industrie 4.0. WORKING GROUP. Forschungsunion, 2013*. Available from:

<

[http://thuvienso.dastic.vn:8080/dspace/handle/TTKHCNDaNang\\_123456789/357](http://thuvienso.dastic.vn:8080/dspace/handle/TTKHCNDaNang_123456789/357)>

. Cited: 19 Feb. de 2018.

KOEPKE, Hoyt. *Why Python rocks for research. Hacker Monthly*, v 8, 2011. Available from: <[https://www.stat.washington.edu/~hoytak/\\_static/papers/why-python.pdf](https://www.stat.washington.edu/~hoytak/_static/papers/why-python.pdf)>. Cited: 19 Feb. 2018.

LASI H, et al. *Industry 4.0*. Junho 2014. Available from: <<https://link-springercom.ez128.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12599-014-0334-4/fulltext.html>>.Cited: 19 Feb. 2018.

LEE, Jay; KAO, Hung-An; YANG, Shanhu. *Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment*. Procedia Cirp, v. 16, p. 3-8, 2014 Available from:<<https://pdfs.semanticscholar.org/d2dd/384dc904c631f4debb8bbc1edb216e85627e.pdf>>. Cited: 19 Feb. 2018.

LI, H. WANG, L. *Research on Technologies in Smart Substation: Energy Procedia*. Vol. 12, 2011, Pages 113-119, ISSN 1876-6102. Available from: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021101842X>>. Cited: 19 Feb. 2018.

MILJKOVIĆ, Dubravko. *Brief Review of Motor Current Signature Analysis. HDKBR INFO Magazin*, v.5, n.1, p.14-26, 2015. Available from:<<https://hrcak.srce.hr/148715>>. Cited:19 Feb. 2018.

MINIPA *Multímetros Digitais* ET-2042E. Disponível em:<<http://www.minipa.com.br/multimetros/multimetros-digitais/349-et-2042e>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

Open Energy Monitor. *Arduino Library List EmonLib*. Available from: <<http://www.arduinolibraries.info/libraries/emon-lib>>. Cited: 19 Feb. 2018.

PORTAL Educação. *O que é monitoramento?* Disponível em: <https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/enfermagem/o-que-emonitoramento/44205>. Acesso em: 19 fev. 2018.

PRENNUSHI, Giovanna; RUBIO, Gloria; SUBBARAO, Kalanidhi. *Monitoring and evaluation. World Bank PRSP Sourcebook*, 2001. Available from: <[http://siteresources.worldbank.org/INTPRS1/Resources/383606-1205334112622/4480\\_chap3.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTPRS1/Resources/383606-1205334112622/4480_chap3.pdf)>. Cited: 19 Feb. 2018.

RFBEE V1.1. *Wireless Arduino compatible node, Seed Studio*. Available from: <<https://www.seeedstudio.com/RFbee-V1.1---Wireless-arduino-compatible-node-p614.html>>. Cited: 19 Feb. 2018.

SAMPAIO, André K. *Manutenção Centrada em Confiabilidade*, janeiro de 2016. Disponível em: <<http://mcc-facic.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

SCHNEIDER. *Qualidade de energia - harmônicas, Workshop de instalações elétricas de baixa tensão, Schneider Electric*. Disponível em: <<https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-ecnicos/harmon.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

SCT-013. *Split-Core Current Transformer*. Available from: <<https://nicegear.co.nz/obj/pdf/SCT-013-datasheet.pdf>>. Cited: 19 Feb. 2018.

SHIN, J.; JUN, H. *On condition based maintenance policy, Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 2, Issue 2, April 2015, Pages 119-127, ISSN 2288-4300. Available from: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2288430014000141>>. Cited: 19 Feb. 2018.

SIEMENS. *This is MindSphere*. Available from: <<https://www.siemens.com/global/en/home/products/software/mindsphere.html>>. Cited: 19 Feb. 2018.

SMITH, S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Available from: <<http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>>. Cited: 19 Feb. 2018.

SUSTO, G. A. et al. *Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach, in IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 11, n. 3, p. 812-820, June 2015. Available from: <<https://pure.qub.ac.uk/portal/files/17844756/machine.pdf>>. Cited: 19 Feb. 2018.

TAGO. *A plataforma completa para conectar todos os seus dispositivos*. Junho 2016. Disponível em: <<https://tago.io/>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

UMA, K. et al. *IOT based Environment Condition Monitoring System*. Indian Journal of Science and Technology. v. 10, n. 17, maio 2017. Cited: 19 Feb. 2018.

VENTURELLI, M. *Indústria 4.0: uma visão da automação industrial*. Automação industrial. Disponível em:< <http://www.automacaoindustrial.info/industria-4-0-umavisao-da-automacaoindustrial>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

WOLLSCHLAEGER, Martin; SAUTER, Thilo; JASPERNEITE, Juergen. *The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0*. In: IEEE XPLORE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE, v. 11, n.1, p.17-27, 2017. Available from:< <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7883994/>>. Cited: 19 Feb. 2018.

WYRELSKI, Jerzy. et al. *Manutenção produtiva total-Um modelo adaptado*. 1997. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/158161>>. Acesso em: 19 fev. 2018.

## ANEXO A – Aferição dos sensores SCT 013

Na tabela 1 são mostradas as medidas de corrente efetuadas para três sensores SCT013-030, para diferentes condições de carga.

Tabela 1 – Medidas de corrente CA sob diferentes condições de carga, em amperes RMS ( $A_{rms}$ ).

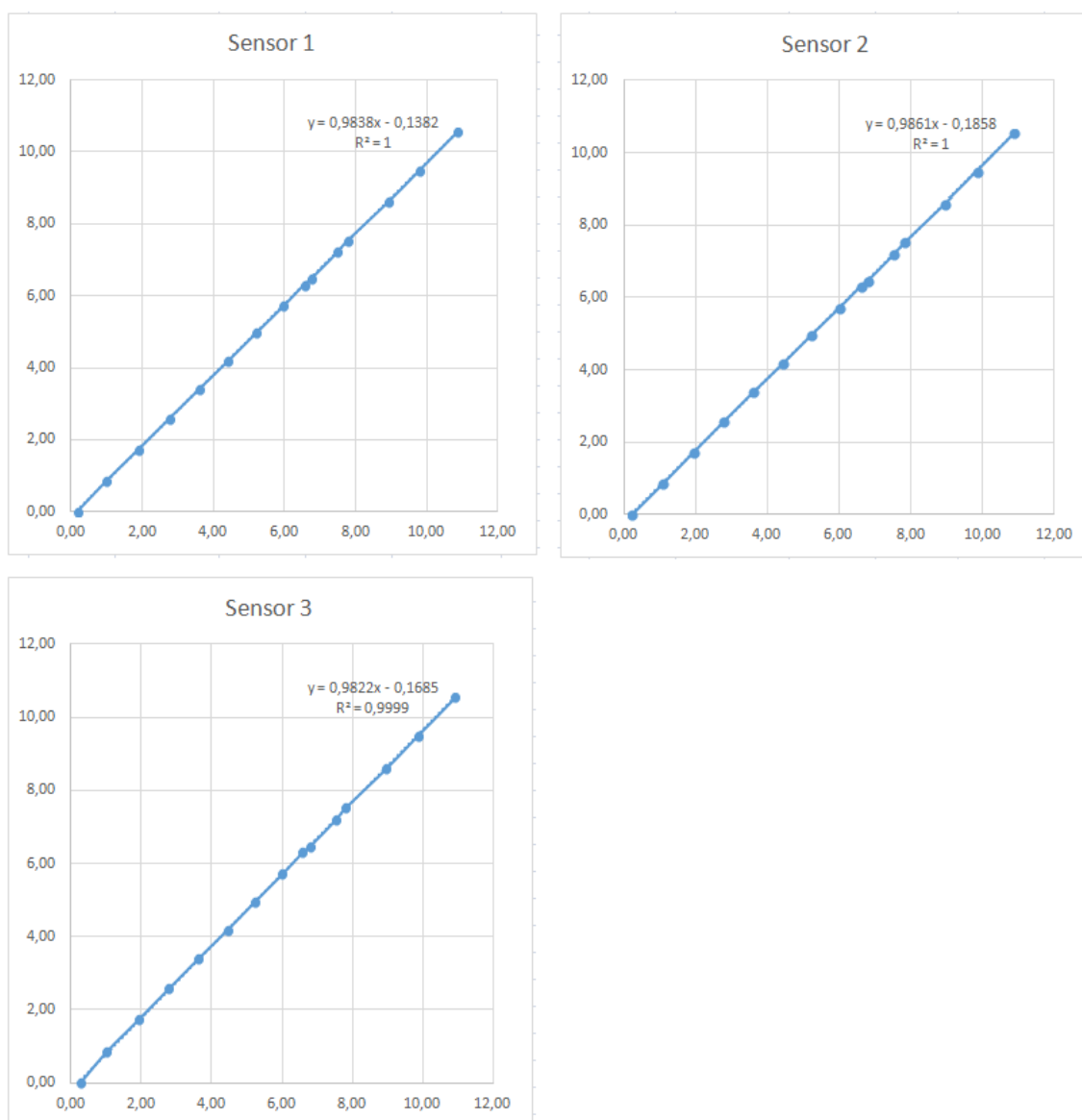
Sensor 1	Multímetro		Sensor 2	Multímetro		Sensor 3	Multímetro
0,17	0,00		0,21	0,00		0,26	0,00
0,98	0,85		1,07	0,85		1,00	0,85
1,88	1,72		1,92	1,72		1,90	1,72
2,74	2,57		2,77	2,57		2,76	2,57
3,58	3,39		3,60	3,39		3,60	3,39
4,40	4,18		4,43	4,18		4,43	4,18
5,19	4,96		5,21	4,96		5,22	4,96
5,96	5,71		5,99	5,71		5,99	5,71
6,54	6,30		6,58	6,30		6,57	6,30
6,74	6,47		6,77	6,47		6,78	6,47
7,48	7,21		7,51	7,21		7,53	7,21
7,76	7,53		7,80	7,53		7,80	7,53
8,90	8,60		8,92	8,60		8,95	8,60
9,79	9,49		9,82	9,49		9,84	9,49
10,84	10,54		10,87	10,54		10,91	10,54

A Figura 1 mostra a informação da Tabela 1 de forma gráfica, onde se pode observar que existe uma relação aproximadamente linear entre as medidas dos sensores e as respectivas medidas realizadas com amperímetro. Se cada sensor estivesse perfeitamente calibrado, esta relação linear seria 1:1, ou seja, valores iguais nas duas medidas. Porém isso não ocorre.

Calculando-se a linha de tendência entre os dados do sensor (eixo horizontal) e do amperímetro (eixo vertical), obtêm-se as equações mostradas na Figura 1. O valor do coeficiente de determinação  $R^2$  é um indicador de quanto os dados se enquadram na representação linear. Cem por cento significa um enquadramento perfeitamente linear.



Figura 1 – Relação entre as medidas de corrente feitas com o sensor SCT013 e as mesmas medidas feitas com um amperímetro CA.



As equações de linha de tendência mostradas na Figura 1, e que correspondem às equações (1) a (3) da seção 3.3, podem ser empregadas como recurso de calibração para as medidas efetuadas pelo sensor de corrente. Para o Sensor 1, por exemplo, o valor lido pelo sensor corresponde à variável X da equação, que será multiplicada por 0,9838 e subtraída de 0,1382 para resultar no valor corrigido, que em princípio, corresponderia à mesma medida se fosse feita diretamente com um amperímetro CA profissional (MINIPA).