

# INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO EM MONITORAMENTO REMOTO DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES



**GILBERTO DE MELO JUNIOR**

Instituto Federal de Goiás

**SANDERSON OLIVEIRA DE MACEDO**

Instituto Federal de Goiás

**GUSTAVO HENRIQUE BORGES**

Instituto Federal de Goiás

**MARCOS OLIVEIRA MIQUELIN**

Instituto Federal de Goiás

**YURI GARCIA RIBEIRO**

Instituto Federal de Goiás

**RENATO MILHOMEM DE OLIVEIRA**

**FILHO**

Instituto Federal de Goiás

**RESUMO:** A área industrial vem passando nos últimos anos por um processo de inovação, conceituada por Indústria 4.0, o que demanda o desenvolvimento de produtos para consolidação desse novo padrão. O objetivo deste trabalho foi a elaboração de um protótipo para aquisição de dados de temperatura e vibração para máquinas elétricas girantes. Além do protótipo físico tam-

bém foi desenvolvido uma interface *web* para visualização e armazenamento destes dados. O resultado foi a obtenção de um produto aplicável em plantas industriais. Este modelo pode ser uma iniciativa eficaz para estimular a disseminação do conceito de Indústria 4.0.

**PALAVRA-CHAVE:** Monitoramento remoto, indústria 4.0, temperatura, vibração, máquinas girantes.

**ABSTRACT:** In recent years, an industrial area has gone through an innovation process, designed for Industry 4.0, which requires the development of products to restore this new standard. The objective of this work was to develop a prototype for the acquisition of temperature and vibration data for rotating electrical machines. In addition to the physical prototype, a web interface was also developed for responses and storage of this data. The result was to use a product applicable in industrial plants. This model can be an effective initiative to stimulate the dissemination of the Industry 4.0 concept.

**KEYWORDS:** Remote monitoring, industry 4.0, temperature, vibration, rotating machines.

## 1. INTRODUÇÃO

Máquinas girantes constituem parte fundamental da rotina humana, atuando desde plantas industriais a usinas de geração de energia elétrica. O valor de restauração de condição de base destes equipamentos, entretanto, é algo que deve ser levado em conta.

Estimar quando um motor ou um gerador sofrerá avarias, ou entender a causa raiz do problema pode ser uma informação valiosa para o mercado. Para isso, é necessário compreender os motivos que levam essas máquinas a falhar e monitorar os respectivos fatores.

Com o intuito de evoluir as práticas, tecnologias e soluções no meio industrial em 2011, surgiu o termo Indústria 4.0, em uma feira de tecnologia de Hannover, Alemanha (HENNING, 2013). A tendência desse novo modelo industrial baseia-se na descrição da digitalização e automação do ambiente de manufatura (OESTERREICH e TEUTEBERG, 2016).

Em relação ao conceito de Indústria 4.0, Zawadski e Zywicki (2016) elucidam que esse novo modelo de indústria é a combinação das conquistas tecnológicas dos últimos anos com a visão de um futuro com sistemas de produção inteligentes e automatizados, no qual o mundo real é ligado ao mundo virtual. Com a conexão de máquinas, sistemas e ativos, as empresas podem criar redes inteligentes, podendo controlar módulos de produção de forma autônoma.

Existem tecnologias essenciais para a implantação e funcionamento da Indústria 4.0, tais como: Internet das Coisas, segurança cibernética, *Big Data*, computação em nuvem, Inteligência Artificial, Robótica avançada e novos materiais (SCHWAB, 2019).

A indústria brasileira ainda sofre com atrasos para implementar o conceito de Indústria 4.0. O uso de tecnologias digitais não vem sendo explorado extensivamente, visto que somente 58% conhecem a relevância da tecnologia para a competitividade da indústria e menos da metade fazem uso (ESPECIAL, 2016). O principal motivo da falta de implementação de novas tecnologias é o custo, já que para as indústrias, o retorno do investimento é incerto.

Vistos os conceitos desse novo modelo industrial, este artigo visa apresentar uma solução tecnológica de monitoramento remoto para máquinas elétricas girantes. Promover o monitoramento inteligente de temperatura e vibração para identificação de falhas em máquinas elétricas está diretamente conectado aos princípios da Indústria 4.0. Em um ambiente fabril, com centenas de motores em toda a planta, é importante garantir que as informações possam ser recebidas de maneira remota e armazenada em um banco de dados para usos futuros.

Assim, este trabalho propõe um sistema de monitoramento remoto de variáveis de temperatura e vibração em máquinas elétricas rotativas, apresentando um protótipo de tecnologia de sensoramento e armazenamento de dados.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

Atualmente, existem diversos trabalhos que estudam o monitoramento de máquinas elétricas. Esse tema tem sido diversamente abordado, principalmente no Brasil, onde de acordo com o Boletim de Consumo de Energia Elétrica do ano de 2009 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), os motores elétricos de indução em indústrias foram responsáveis pelo consumo de 23% de toda energia elétrica produzida no país (DE PESQUISA ENÉRGICA, 2009).

Carvalho et al. (2010) realizaram um estudo sobre o monitoramento wireless de eficiência e condição de operação de motores de indução trifásicos. Nesse trabalho o objetivo foi monitorar os dados de tensão e corrente no motor, medindo, portanto, sua eficiência e analisando a adequação das condições de operação e dimensionamento para a função desempenhada pelo motor.

A manutenção preditiva consiste no controle da máquina em serviço, efetuado com instrumentos de medição, para prever irregularidades ou detectar variações na condição de operação que demandem tarefas de manutenção (MARCAL, 2000). Leme et al. (2017) fazem o uso da manutenção preditiva com o monitoramento de tensão, corrente, vibração e temperatura dos motores. Nesse estudo, os autores também utilizaram o armazenamento de dados para usos futuros.

Uma outra abordagem de monitoramento remoto, diferindo no campo de aplicação, é o monitoramento remoto de ambientes. Kodali e Mahesh (2016) fizeram o monitoramento de temperatura e umidade de um ambiente utilizando módulo *Wi-Fi* ESP8266, um sensor tanto de temperatura quanto de umidade e um display OLED. No trabalho é mostrado que a escolha de componentes é economicamente viável.

Ainda falando sobre a área de monitoramento de ambientes, o trabalho de Saha e Majumdar (2017) baseia-se em um sistema de Internet das Coisas para monitorar a temperatura de um centro de processamento de dados. Neste estudo, notificações poderiam ser enviadas por e-mail ou SMS caso a temperatura ambiente ultrapassasse um valor limite estabelecido.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho constituiu desde a escolha dos componentes, que pudesse viabilizar o projeto, até o desenvolvimento da interface de visualização dos dados. O sistema de monitoramento seguiu a topologia ilustrada na Figura 1.

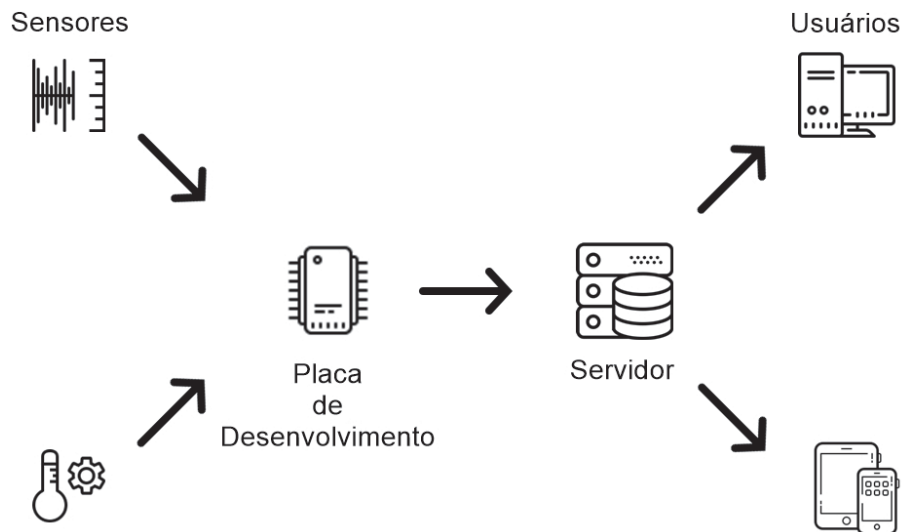


Figura 1 – Topologia do Projeto. Fonte: Próprios autores.

A topologia apresentada indica conexão entre os sensores de temperatura e vibração com a placa de desenvolvimento, que por sua vez faz conexão com o servidor, onde é possível os usuários visualizarem e analisarem os dados medidos.

A placa de desenvolvimento escolhida foi a plataforma NodeMCU da família ESP32, criada para o desenvolvimento de projetos de Internet das Coisas (AL DAHOUD e MOHAMED, 2018). Entre as particularidades dessa placa, destaca-se o baixo custo, suporte integrado a redes WiFi, tamanho reduzido e baixo consumo de energia.

O sensor de temperatura utilizado foi o DS18B20, capaz de fornecer medições de temperatura em graus Celsius com precisão de 9 a 12 *bits*. O DS18B20 trabalha com o protocolo de comunicação *One Wire* que, por definição, requer apenas uma linha de dados (e aterramento) para comunicação com um microprocessador central. Possui uma faixa de temperatura operacional de -55 °C a +125 °C e tem precisão de  $\pm 0,5$  °C na faixa de -10 °C a +85 °C. Além disso, o DS18B20 pode derivar energia diretamente da linha de dados (alimentação parasita), eliminando a necessidade de uma fonte de alimentação externa. Cada DS18B20 possui um código serial exclusivo de 64 bits, que permite operação conjunta de vários sensores (MAXIMINTEGRATED, 2019).

Após analisar sensores de vibração disponíveis no mercado, optou-se pelo sensor MPU-6050, que contém em seu chip um acelerômetro triaxial e giroscópio MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*), além de um conversor analógico-digital de 16 bits. Foi adquirido a placa GY-521 que possui o sensor MPU-6050 integrado. Além disso, a GY-521 também um sensor de temperatura integrado, que permite medições entre -40 e 85 °C (INVENSENSE, 2013). O sensor de temperatura integrado a GY-521 foi utilizado para a medição da temperatura interna do circuito, visando garantir sua operação dentro dos limites térmicos aceitáveis alertando ao usuário qualquer problema relacionado a esse fator que possa acometer o protótipo.

Conforme a topologia de projeto, criou-se um servidor, para recepção e armazenamento dos dados da placa microcontroladora e exibição dos mesmos em interface visual. Nesse projeto, optou-

se por utilizar como servidor um notebook com sistema operacional Windows de modo a evitar oneração de custos do protótipo.

A placa NodeMCU pode ser programada em linguagem LUA ou C/C++ através da IDE do microcontrolador Arduino, sendo essa utilizada para programar as configurações necessárias. Dentre elas, a primeira consistiu na importação das bibliotecas usadas pela NodeMCU (módulo *Wi-Fi* embarcado no NodeMCU), pelo sensor de temperatura DS18B20 (comunicação *OneWire*), pelo acelerômetro MPU-6050 (comunicação I2C) e para o envio dos dados ao servidor (protocolo MQTT – *MQ Telemetry Transport*). A implementação da conexão Wi-Fi foi realizada utilizando as bibliotecas *Wi-Fi*, *WiFiManager*, *WebServer* e *DNSServer*.

O sensor DS18B20 possui dois tipos de conexões. O chamado “normal”, é feito utilizando três fios, sendo alimentação, aterramento e sinal (dados) para o microprocessador. O outro modo é o denominado “Parasita”, onde os fios de alimentação e de aterramento são curto-circuitados, e o sensor é alimentado diretamente pelo pino de dados. O protótipo construído utiliza conexão normal pois o modo parasita não é recomendado para temperaturas maiores que 100 °C, já que a comunicação pode ser prejudicada pela ação de correntes de fuga típicas dessa faixa de operação (MAXIMINTEGRATED, 2019).

A comunicação do acelerômetro MPU-6050 pode ser realizada de duas formas: via protocolo *I2C* (*Inter-Integrated Circuit*) ou *SPI* (*Serial-Peripheral Interface*). O tipo de comunicação escolhido impacta diretamente na construção do hardware do sistema. No caso do protótipo, o aspecto construtivo da placa GY-521 compeliu o uso do protocolo de comunicação I2C entre o NODEMCU e a GY-521.

No servidor foi utilizado o *software Node-RED*, cuja principal característica é a possibilidade do desenvolvimento em qualquer sistema operacional, sendo necessário apenas a instalação de um pacote de módulos específico e o Node.js, que é um node pré-compilado que permite a programação em *JavaScript*. O ambiente de desenvolvimento *Node-RED* pode ser acessado via navegador *web* pelo endereço de *localhost* ou 127.0.0.1 na porta 1880 por padrão, podendo ser alterada. A partir do ambiente mencionado foram desenvolvidos a comunicação entre o *NodeMCU* e servidor, a interface *web* e o armazenamento de dados do sistema.

Para implementação do protocolo *MQTT* na programação do *NodeMCU* foi utilizada a biblioteca *PubSubClient*, que realiza o encapsulamento e envio dos dados dos sensores separando-os em tópicos, de modo que esses dados possam ser lidos separadamente.

A interface *web* ou *UI* (*User Interface*) é responsável pela parte visual do projeto, por onde o usuário interage com um determinado aplicativo, programa de computador, rede social, site ou até mesmo algum produto físico. Para a interface *web* optou-se pelo modelo de *dashboard*, que nada mais é que um painel visual que apresenta, de maneira centralizada, um conjunto de informações: indicadores e suas métricas.

O desenvolvimento da interface *web* foi realizado através do módulo de *node-red-dashboard* disponível no *Node-RED*, já que este fornece um conjunto de nós para criar rapidamente um painel de dados em tempo real. O módulo disponível no *Node-RED* contém várias funções gráficas,

possibilidades de separação de grupos por abas, botões iterativos e opções de alteração do *design* da página criada.

Após o recebimento dos dados via *MQTT* e apresentação no *dashboard*, foi implementado o armazenamento dos dados no servidor com a utilização de alguns *function nodes* (nós de função). Dentre eles, foi configurado para que o sistema aguarde o recebimento das informações de todos os sensores e acrescente a eles um *timestamp* (etiqueta de tempo), permitindo ao usuário pode visualizar as informações e realizar análises para mitigação de futuros problemas que possam afetar a máquina.

Com as configurações de armazenamento e *timestamp* definidas, foi designado diretório para armazenamento dos dados recebidos pelos sensores após conversão para o formato .CSV.

Para conectar todo o hardware do sistema, foi projetada uma placa de circuito impresso no computador utilizando o *software Fritzing*. A placa possui dimensões de aproximadamente 55x50x2 milímetros, e é composta de apenas uma camada (ou *layer*) de cobre. A Figura 2 ilustra o diagrama esquemático da placa.

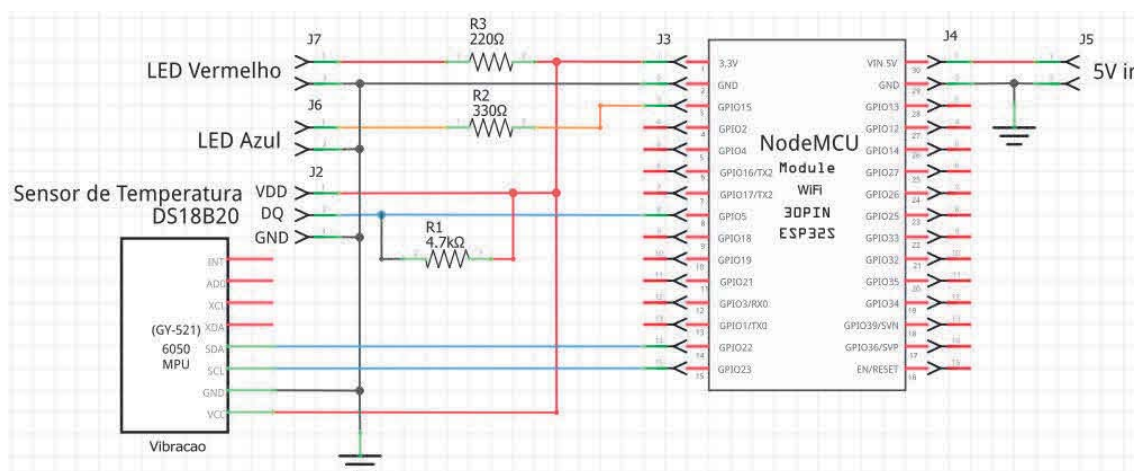


Figura 2 – Diagrama esquemático da placa desenvolvida. Fonte: Próprios autores.

Foram realizados testes para verificação do funcionamento dos sensores e do armazenamento dos dados.

## 4. RESULTADOS

O protótipo para medição, transmissão, armazenamento e visualização de dados de temperatura e vibração foi desenvolvido a partir dos materiais e métodos descritos. A Figura 3 ilustra a captura dos dados dos sensores através da placa NodeMCU sendo apresentados pela IDE do Arduino.



```

COM3

TempMotor : 29.81
=====
TempESP : 30.15
accX : 1.03    accY : 0.10    accZ : -0.01
=====

TempMotor : 29.81
=====
TempESP : 30.34
accX : 1.03    accY : 0.10    accZ : -0.00
=====

TempMotor : 29.87
=====
TempESP : 30.29
accX : 1.03    accY : 0.09    accZ : -0.01
=====

TempMotor : 30.00
=====
TempESP : 30.29
accX : 1.02    accY : 0.10    accZ : -0.01
=====

TempMotor : 30.00
=====
TempESP : 30.29
accX : 1.03    accY : 0.10    accZ : -0.01
=====

```

Figura 3 – Aquisição dos dados dos sensores apresentados na IDE do Arduino. Fonte: Próprios autores.

Conforme ilustrado na Figura 3 houve a aquisição de 5 variáveis, sendo elas: temperatura do motor (*TempMotor*), temperatura interna do sistema (*TempESP*) e vibração nos três eixos dimensionais. A Figura 4 ilustra a interface web apresentando de forma gráfica os dados ao usuário.



Figura 4 – Telas da Interface Web. Fonte: Próprios autores.

Com a aquisição dos dados dos sensores, os mesmos puderam ser armazenados em arquivo .CSV conforme ilustra a figura 5.

Timestamp	TempMotor	TempESP	AccX	AccY	AccZ
2019-12-10 22:28:32	28,125	34,812	-0,032	0,007	-0,013
2019-12-10 22:28:33	28,125	35,000	-0,032	0,004	-0,019
2019-12-10 22:28:35	28,125	34,906	-0,034	0,013	-0,011
2019-12-10 22:28:36	28,125	34,906	-0,030	0,012	-0,009
2019-12-10 22:28:37	28,125	34,859	-0,028	0,008	-0,031
2019-12-10 22:28:38	28,125	34,906	-0,028	0,019	-0,013
2019-12-10 22:28:39	28,125	34,953	-0,028	0,011	-0,013
2019-12-10 22:28:40	28,125	34,906	-0,023	0,012	-0,015
2019-12-10 22:28:41	28,125	34,906	-0,034	0,010	-0,018
2019-12-10 22:28:43	28,125	34,906	-0,024	0,011	-0,005

Figura 5 – Armazenamento dos dados em arquivo .CSV. Fonte: Próprios autores.

Por fim, a Figura 6 apresenta o protótipo instalado em um motor elétrico para os testes.

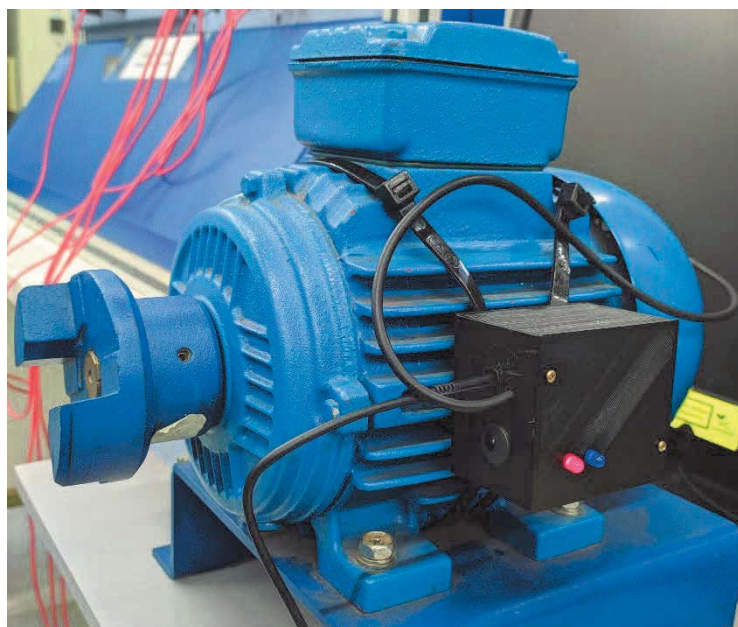


Figura 6 – Protótipo de aquisição de dados de temperatura e vibração instalado em um motor elétrico. Fonte: Próprios autores.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma proposta de protótipo de monitoramento remoto de vibração e temperatura tendo em vista as necessidades atuais de indústrias e outros setores que utilizam de máquinas elétricas. Com o protótipo desenvolvido, foi possível acompanhar o estado de um ou mais sensores em diferentes localizações através de qualquer dispositivo compatível com a interface web.

Para trabalhos futuros, as possibilidades são vastas. Uma vez que se pode monitorar e armazenar os dados obtidos com o protótipo, um possível próximo passo, é fazer uso de inteligência



artificial para prever problemas, atuando de forma preditiva nos equipamentos. Da mesma forma, uma vez coletando dados e obtendo as características de uma possível quebra/falha em máquinas elétricas girantes, pode-se atuar em conjunto com inversores de frequência ou outros tipos de controle de máquinas elétricas girantes para evitar tais problemas.

## 6. REFERÊNCIAS

AL DAHOUD, A. e MOHAMED, F. NodeMCU V3 For Fast IoT Application Development. 2018

CARVALHO, Daniel Pereira de et al. Monitoramento wireless de eficiência e condição de operação de motores de indução trifásicos. 2010.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, Empresa. Balanço Energético Nacional 2009: Ano base 2008. *Brasília: Ministério de Minas e Energia do Brasil*, 2009.

ESPECIAL, S. Indústria 4.0. *Revista da Confederação Nacional Da Indústria*. Brasília: Ed, v. 66, 2016.

HENNING, Kagermann. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. 2013.

INVENSENSE. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013. Disponível em: <<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em: 04 de Junho de 2020.

KODALI, Ravi Kishore; MAHESH, Kopulwar Shishir. Low cost ambient monitoring using ESP8266. In: *2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. IEEE, 2016. p. 779-782.

LEME, Murilo Oliveira et al. Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério. 2017.

MARCAL, Rui Francisco Martins. Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica Fuzzy. 2000.

MAXIMINTEGRATED. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer, 2019. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 09 de junho 2020.

OESTERREICH, Thuy Duong; TEUTEBERG, Frank. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in industry*, v. 83, p. 121-139, 2016.

SAHA, Saraswati; MAJUMDAR, Anupam. Data centre temperature monitoring with ESP8266 based Wireless Sensor Network and cloud based dashboard with real time alert system. In: *2017 Devices for Integrated Circuit (DevIC)*. IEEE, 2017. p. 307-310.

SCHWAB, Klaus. A quarta revolução industrial. Edipro, 2019.

ZAWADZKI, Przemysław; ŻYWICKI, Krzysztof. Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept. *Management and Production Engineering Review*, 2016.