

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME VINÍCIUS CASANOVA

**DESENVOLVIMENTO DE ROTINAS DE UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA
DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUIDO UTILIZANDO REDES INDUSTRIAIS
DE COMUNICAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

GUILHERME VINÍCIUS CASANOVA

**DESENVOLVIMENTO DE ROTINAS DE UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA
DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUIDO UTILIZANDO REDES INDUSTRIAIS
DE COMUNICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Endo

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Vinícius Casanova

Desenvolvimento de rotinas de utilização de um sistema digital de controle distribuído utilizando redes industriais de comunicação

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 16/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem Ele nada teria acontecido. Por ter me dado saúde para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais Edilson e Lucineia, pois sempre me ajudaram em tudo e não mediram esforços para eu alcançar meus objetivos. Aos meus irmãos Gustavo e Ana Livia, por todo apoio. E a minha noiva Rebeca, por todo incentivo e companheirismo durante essa jornada.

Ao Prof. Dr. Wagner Endo pela prontidão, paciência e auxílio em toda orientação deste trabalho. Também agradeço aos professores Dr. Paulo Rogério Scalassara e Dr. Emerson Ravazzi pelas correções e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, a todos meus colegas de graduação que direta ou indiretamente contribuíram para que o objetivo final fosse alcançado.

RESUMO

CASANOVA, G. V. **Desenvolvimento de rotinas de utilização de um sistema digital de controle distribuído através de redes industriais de comunicação.** 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Este trabalho propõe a integração de medidores de vazão, medidores de pressão e um registrador na arquitetura de um sistema digital de controle distribuído. Além de desenvolver rotinas de utilização que deixam explícitos os conceitos de Indústria 4.0 e *Industrial Internet of Things (IIoT)*. Para atingir tal objetivo é instalado e integrado tais medidores para o monitoramento e o controle de uma linha de ar comprimido de uma planta industrial. A comunicação foi feita pelo protocolo de comunicação 4-20mA HART. Após a integração do sistema, testes e rotinas foram desenvolvidas para validar o funcionamento da arquitetura. O primeiro teste foi físico, expondo os valores medidos no processo diretamente através do registrador. O segundo teste foi digital, onde os valores foram acessados de maneira remota e por fim, uma rotina de alerta por e-mail foi desenvolvida em um ponto crítico do processo, demonstrando assim os conceitos de Indústria 4.0 e *IIoT*.

Palavras-chave: Indústria 4.0; *IIoT*; Medidores de pressão; Medidores de vazão; Registrador.

ABSTRACT

CASANOVA, G. V. **Development of a usage routines in a distributed control system through industrial communication networks**. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work proposes the integration of flow meters, pressure meters and a recorder in the architecture of a digital distributed control system. In addition to developing usage routines that make the concepts of Industry 4.0 and Industrial Internet of Things (IIoT) explicit. To achieve this goal, such meters are installed and integrated for monitoring and controlling a compressed air line in an industrial plant. Communication was done using the 4-20mA HART communication protocol. After system integration, tests and routines were developed to validate the architecture's operation. The first test was physical, showing the values measured in the process directly through the recorder. The second test was digital, where the values were accessed remotely and finally, an email alert routine was developed at a critical point in the process, thus demonstrating the concepts of Industry 4.0 and IIoT.

Keywords: Industry 4.0; IIoT; Pressure meter; Flowmeter; Recorder.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores obtidos da vazão e pressão para validar arquitetura.....	22
Quadro 2 – Valores obtidos da vazão e pressão para validar arquitetura.....	26
Quadro 3 – Valores obtidos remotamente para validar arquitetura.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide de Automação.....	7
Figura 2 – Sistema SCADA comunicando-se com quatro CLPs.....	16
Figura 3 – Controle Centralizado (DDC).....	17
Figura 4 – Barramento de Campo.....	17
Figura 5 – Barramento de Campo Distribuído.....	18
Figura 6 – Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD).....	18
Figura 7 – Diagrama de consumo de ar comprimido.....	22
Figura 8 – Medidor de vazão instalado na linha de ar comprimido.....	23
Figura 9 – Medidor de pressão com sua conexão elétrica e comunicação.....	24
Figura 10 – Registrador com visor integrado com as medições.....	24
Figura 11 – Visor do Registrador com as medições sendo exibidas em tempo real.....	26
Figura 12 – Verificação Remota do Registrador.....	28
Figura 13 – Acompanhamento dos dados em tempo real remotamente.....	29
Figura 14 – Definição de alarme remotamente no registrador.....	30
Figura 15 – Email de alerta para valores pré-definidos no registrador.....	31

LISTA DE SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
DDC	<i>Direct Digital Control</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVOS	8
1.1.1 Objetivo geral.....	8
1.1.2 Objetivos específicos.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1 SENSORIAMENTO.....	10
2.2 INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL	10
2.2.1 MEDIDORES DE VAZÃO	12
2.2.2 MEDIDORES DE PRESSÃO	13
2.3 SISTEMAS DE SUPERVISÃO E CONTROLE.....	15
2.4 REDES DE COMUNICAÇÕES INDUSTRIAIS.....	16
2.5 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL	19
2.5.1 HART	19
2.6 INDÚSTRIA 4.0 E IIoT	20
3. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO	21
3.1 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA.....	21
3.2 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO.....	21
4. RESULTADOS	25
4.1 TESTE FÍSICO.....	25
4.2 TESTE DIGITAL.....	27
4.3 TESTE DE ALERTA.....	30
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS.....	34
ANEXO A – ACESSO REMOTO DO REGISTRADOR	36
ANEXO B – DEFINIR UM ALARME PARA PONTOS CRÍTICOS DO PROCESSO	38

1 INTRODUÇÃO

Entende-se por automação industrial qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano para melhoria na qualidade dos produtos, rapidez, redução de custos e segurança das pessoas, assim aperfeiçoando os complexos objetivos das indústrias e dos serviços. A automação industrial envolve a implantação de sistemas interligados e assistidos por redes de comunicação, compreendendo sistemas supervisórios que possam auxiliar os operadores no exercício da supervisão e da análise dos problemas que porventura venham a ocorrer (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

Tem-se a instrumentação industrial, uma ramificação da automação, na qual é conhecida como a ciência que aplica, desenvolve e elabora técnicas para adequação de instrumentos para controle, registro, medição e indicação de variáveis físicas nos processos industriais. Sendo as principais grandezas físicas: pressão, nível, vazão, temperatura, massa, densidade, concentração. (DE ROURE, 2017).

Atualmente, muitos sistemas e técnicas têm sido desenvolvidos para o controle de operação, supervisão e gerenciamento de processos industriais. É neste contexto que fica evidente a importância da automação e instrumentação industrial (LOPEZ, 2000).

Nesse contexto as redes industriais têm seu importante papel, dando todo suporte a sistemas controlados por computadores, em funções que vão desde o controle de processos até à automação industrial. Estes sistemas propõem condições de tempo real à rede de comunicação (TOVAR, 1999).

A revolução da comunicação industrial na tecnologia da automação está revelando um enorme potencial na otimização de sistemas de processo e tem feito uma importante contribuição na direção da melhoria no uso de recursos (CASSIOLATO, 2011).

Segundo Moraes e Castrucci (2007), pode-se representar a arquitetura da automação industrial por uma pirâmide, Figura 1, mostrando seus diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial. Por sua vez, as redes de comunicação têm uma considerável importância, pois

estão presentes em todos os níveis de interação. Com o objetivo de trocar informações entre os computadores, instrumentos, inversores de frequência, CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), relés de proteção entre outros, as redes devem ser padronizadas para possibilitar uma maior integração do processo. Em consequência dessa necessidade de padronização foram criados vários protocolos de comunicação, como exemplo: HART, MODBUS, PROFIBUS, ETHERNET.

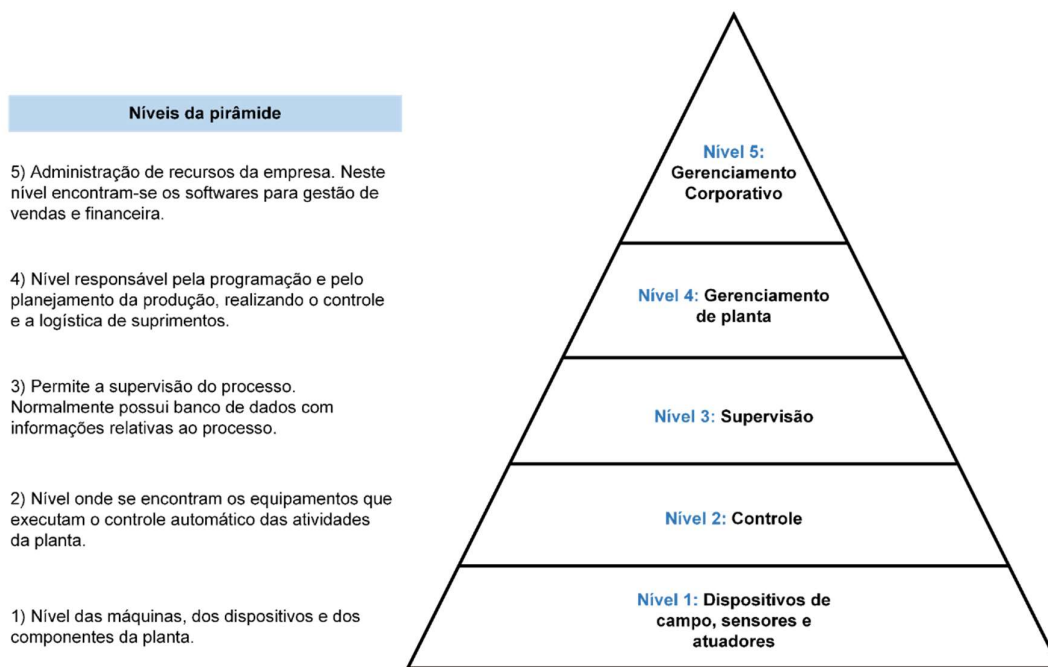


Figura 1 – Pirâmide de Automação.
Fonte: Adaptado Moraes e Castrucci (2007).

A criação de sistemas supervisórios para controlar e monitorar processos industriais são essenciais para o crescimento das empresas, já que um controle feito de forma competente produz ganhos expressivos de qualidade e produtividade, além de garantir a segurança dos operadores. Estes sistemas são conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Assim é possível centralizar informações, para que se tenha o maior número de dados com um curto intervalo de tempo. Também é um mecanismo que possibilita um diálogo entre o ser humano e o processo, mais conhecido como Interface Homem-Máquina (IHM) (FERREIRA JÚNIOR, 2012).

Com o avanço da tecnologia, cada vez mais a obtenção dos dados tende-se a ficar mais prática, segura e importante no ramo industrial. Muito se

fala dos conceitos: Indústria 4.0 e *Industrial Internet of Things* (IIoT), ou também como é conhecida Internet das coisas. Ambos têm por objetivo implementar dispositivos inteligentes em campo e tornar a indústria mais conectada.

Dessa forma, esse trabalho foi realizado na fábrica da Endress+Hauser no Brasil, onde são produzidos medidores de vazão, nível e pressão, com a proposta de integrar medidores de vazão e pressão em uma linha de distribuição de ar comprimido industrial com um registrador gráfico, a fim de monitorar e controlar o consumo do ar comprimido nessa fábrica. Com esse monitoramento, pode-se ter um controle da quantidade consumida para as diferentes estações de produção (vazão, nível e pressão).

A integração foi feita pelo protocolo de comunicação HART 4-20mA, por ser um protocolo de comunicação simples e confiável. Portanto, tem-se uma arquitetura simplificada de um sistema digital de controle distribuído. Com essa integração, com os testes e rotinas desenvolvidas, os conceitos de “Indústria 4.0” e “*Industrial Internet of Things*” são evidenciados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo integrar medidores de vazão, medidores de pressão e um registrador utilizando redes industriais de comunicação para monitorar e controlar o consumo da linha de ar comprimido da fábrica da Endress+Hauser no Brasil. Sendo todos os instrumentos utilizados da própria Endress+Hauser.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o medidor de vazão e o medidor de pressão, bem como seus princípios de funcionamento e aplicações;
- Estudar sobre o protocolo HART e suas aplicações;
- Estudar o registrador utilizado;
- Fazer as ligações e testes do sistema;
- Acompanhar e monitorar os valores obtidos;
- Criar rotinas no contexto da *IIoT* e Indústria 4.0.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a realização e o entendimento deste projeto é necessário a compreensão sobre sensoriamento, instrumentação industrial (medidores de vazão, medidores de pressão, registradores), sistemas de supervisão e controle, redes industriais, protocolos de comunicação. Também será abordado sobre Internet 4.0 e *IloT (Industrial Internet of Things)*. Este capítulo explicará de forma sucinta sobre os assuntos citados.

2.1 SENSORIAMENTO

Sensores são dispositivos amplamente utilizados na automação industrial que transformam variáveis físicas, como posição, velocidade, temperatura, nível, pH etc., em variáveis convenientes. Se estas são elétricas, a informação propriamente dita pode estar associada à tensão ou à corrente; o segundo caso é mais usual, porque implica num receptor de impedância baixa e, portanto, maior imunidade à captação de ruídos eletromagnéticos. Modernamente, em ambientes mais ruidosos e com distâncias maiores é amplamente utilizada a transmissão ótica via fibras óticas. (CAPELLI, 2006).

O objetivo principal da automação é comandar e supervisionar eventos em tempos reais baseados nesses sensores. Há os transdutores, que são sensores de medição e são importantíssimos ao controle do processo (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

2.2 INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

Instrumentação é a ciência que aplica e desenvolve técnicas para adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas em equipamentos nos processos industriais. Nas

indústrias caracterizadas como “indústrias de processos”, a instrumentação de campo faz parte do sistema de controle e de automação. As principais grandezas físicas encontradas e medidas em tais processos industriais são pressão, nível, vazão, temperatura, massa, densidade, pH, deslocamento, velocidade angular entre outras (BRANDÃO, 2016).

Os instrumentos em sistemas de automação são integrados a fim de monitorar e/ou controlar processos industriais. É encontrado em diversas indústrias: alimentos e bebidas, papel e celulose, plantas químicas, mineradoras, usinas de açúcar e etanol, entre outras. Um conjunto desses instrumentos integrados chama-se malha, e os instrumentos que compõem uma malha são classificados pela função que exercem:

- Sensores/transdutores: dispositivos ou elementos que detectam alterações nas variáveis físicas de processo e fornecem uma grandeza de saída em geral elétrica;
- Transmissor: instrumento que tem a função de converter sinais dos sensores, geralmente sinais elétricos de baixa potência, em outra forma de sinal (analógico ou digital) e capaz de enviar para um instrumento receptor;
- Registrador: instrumento que registra graficamente valores instantâneos medidos ao longo do tempo, valores estes recebidos de transmissores;
- Controlador: Instrumento que compara um valor medido a um valor desejado e, baseado na diferença entre eles, emite um sinal de correção para que a diferença entre o valor medido e o valor desejado seja zero;
- Atuador: Instrumento cuja função é a de transformar um sinal vindo, em geral, de um controlador para uma atuação física efetiva no processo. Por exemplo, válvulas, motores, compressores ou atuadores pneumáticos.

Nos seguintes capítulos abordará brevemente sobre os medidores e sobre o registrador para melhor compreensão dos instrumentos.

2.2.1 MEDIDORES DE VAZÃO

Para entender sobre os medidores de vazão ou fluxo, é necessário antes compreender o conceito na qual esse medidor opera. Pode-se definir vazão como a quantidade volumétrica, mássica ou gravitacional de um fluido que passa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo (DE ROURE, 2017).

Outro importante ponto a mencionar sobre os tipos de vazão para esses medidores

- I. **Vazão Volumétrica:** é a quantidade em volume que escoar através de uma certa seção em um intervalo considerado. Sendo representada pela letra **Q**, que por sua vez é o resultado da fração entre o volume (v) pelo tempo (t):

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

- II. **Vazão Mássica:** é a quantidade em massa de um fluido que atravessa a seção de uma tubulação por unidade de tempo, sendo representada, normalmente, por **Qm**, que é obtida da fração entre a quantidade de massa (m) pelo tempo (t):

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (2)$$

Há diferentes tipos e características de medidores de vazão. O princípio de medição varia de acordo com a necessidade do processo, aplicação e do fluido. Entre os princípios mais conhecidos estão os medidores: eletromagnéticos, coriolis, vortex, termais, de pressão diferencial, ultrassônicos e deslocamento positivo. Esse trabalho abordará sobre os medidores de vazão termais, nas quais são específicos para aplicações de ar comprimido. Poderia ser utilizado outro medidor, por exemplo, o medidor coriolis. Entretanto, elevaria muito o custo do trabalho e para essa aplicação, os medidores termais atendem perfeitamente.

Os medidores termais medem a vazão mássica direta normalmente de gases industriais, ar comprimido e fluidos aquosos. Comumente usados em

aplicações onde a alta rangeabilidade ou as perdas de baixa pressão forem importantes ou em aplicações de medições de gases em vários setores industriais, esses medidores são uma boa escolha.

O princípio de medição é amplamente utilizado na indústria e é utilizado em muitas aplicações com vazão de gás:

- Ar comprimido (consumo, distribuição);
- Dióxido de carbono (produção e resfriamento de bebidas);
- Argônio (em produção de aços);
- Nitrogênio e oxigênio (produção);
- Gás natural (para controle de alimentação de queimadores);
- Ar e biogás (estação de tratamento de efluentes).

Esse princípio de medição é baseado no fato de que o calor é extraído de um corpo aquecido quando a vazão de fluídos passar. Um medidor termal de vazão mássica contém dois sensores de temperatura PT100 para esse fim. Um sensor mede a temperatura atual do fluído como referência. O segundo sensor é aquecido e tem um diferencial de temperatura constante relativo ao primeiro sensor em “vazão zero”.

À medida que o fluído passa pela tubulação, o sensor de temperatura aquecido esfria em consequência da vazão do fluído. Quanto maior for a vazão, maior o efeito do resfriamento. A corrente elétrica necessária para manter o diferencial de temperatura é diretamente proporcional a vazão mássica do fluído que passa pela tubulação.

Essa tecnologia traz alguns benefícios, entre eles:

- Medição multivariável – medição direta de vazão mássica e temperatura;
- Alta rangeabilidade;
- Reação rápida em flutuações.

2.2.2 MEDIDORES DE PRESSÃO

A variável pressão em processos industriais é uma das mais medidas e controladas na indústria de controle de processos nos mais diversos

segmentos. Além disso, através da pressão é possível facilmente inferir uma série de outras variáveis de processo, tais como nível, vazão e densidade (BRANDÃO, 2016).

É possível classificar a medição de pressão como: manométrica, absoluta e diferencial ou relativa:

- **Pressão absoluta:** é obtida em relação ao vácuo perfeito, em outras palavras é a diferença de pressão em um determinado ponto de medição comparando ao zero absoluto (pressão do vácuo). Tipicamente, quando se indica esta grandeza usa-se a notação em *abs*;
- **Pressão diferencial:** é a diferença de pressão medida entre dois pontos. Quando qualquer ponto diferente do vácuo ou atmosfera é tomado como referência diz-se pressão diferencial. Pode-se tomar como exemplo a pressão diferencial encontrada numa placa de orifício;
- **Pressão manométrica (*gauge*):** é medida em relação a pressão do ambiente, ou seja, em relação a atmosfera. Em outras palavras, é a diferença entre a pressão absoluta em um ponto determinado e a pressão atmosférica.

Assim como existem métodos diferentes para medir a vazão, tem-se o mesmo para pressão. Em geral, os sensores de medição são classificados conforme a técnica usada na conversão mecânica de pressão em um sinal eletrônico proporcional. Entre os medidores de pressão mais conhecidos estão: os capacitivos, piezo-resistivo, piezo-eletrico, ótico entre outros. Para o trabalho foi utilizado o medidor de pressão baseado no princípio piezo-resistivo, por tratar-se de um medidor com ótimo custo-benefício para a aplicação do trabalho.

Esse equipamento possui uma célula de silício e um diafragma de isolamento. À medida que uma pressão é exercida, esse diafragma é desviado e um fluido de enchimento transfere a pressão para uma ponte de resistência (*wheatstone*). A variação da pressão provoca uma tensão de saída da ponte, sendo esse valor proporcional ao valor da pressão da linha.

2.2.3 REGISTRADORES

Outro instrumento comumente utilizado na indústria são os registradores. Em geral, os registradores têm as funções de armazenar, organizar e exibir os valores medidos nos processos. Para esse trabalho, foi utilizado o Memograph da Endress+Hauser. Sendo um sistema flexível e robusto que organiza os valores do processo.

Com operação fácil e rápida de integrar a qualquer aplicação. Os valores do processo são exibidos no display e registrados de maneira segura. Usando de protocolos de comunicação, os valores medidos e calculados podem ser facilmente transmitidos a sistemas de níveis mais altos e os módulos individuais da fábrica podem ser interligados (DE ROURE, 2017).

2.3 SISTEMAS DE SUPERVISÃO E CONTROLE

Considerado uma unidade de controle centralizado na linha de produção, o sistema supervísório pode ser avaliado como o nível mais alto de interface homem máquina, pois mostra o que está acontecendo no processo e permitem a atuação sobre este.

Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*) são aplicativos que permitem que as variáveis de um processo produtivo ou instalação física sejam coletadas, interpretadas, armazenadas e apresentadas ao usuário. Essas informações podem ser monitoradas por meio de telas gráficas com atualizações instantâneas das variáveis do processo. Os dados são recebidos de um CLP ou controlador, por exemplo, e os softwares supervísórios auxiliam no processo de controle da qualidade e de movimentação de dados para gerenciamento e diretrizes. Desta forma, a escolha do software de supervisão é importante na estratégia de automação de uma empresa (CAPELLI, 2009).

O dispositivo de controle que se comunica com um sistema SCADA é denominado RTU (*Remote Terminal Unit*) e normalmente é um CLP. Pode-se

ver o exemplo através da figura 2, na qual um sistema SCADA faz a aquisição de quatro CLPs.

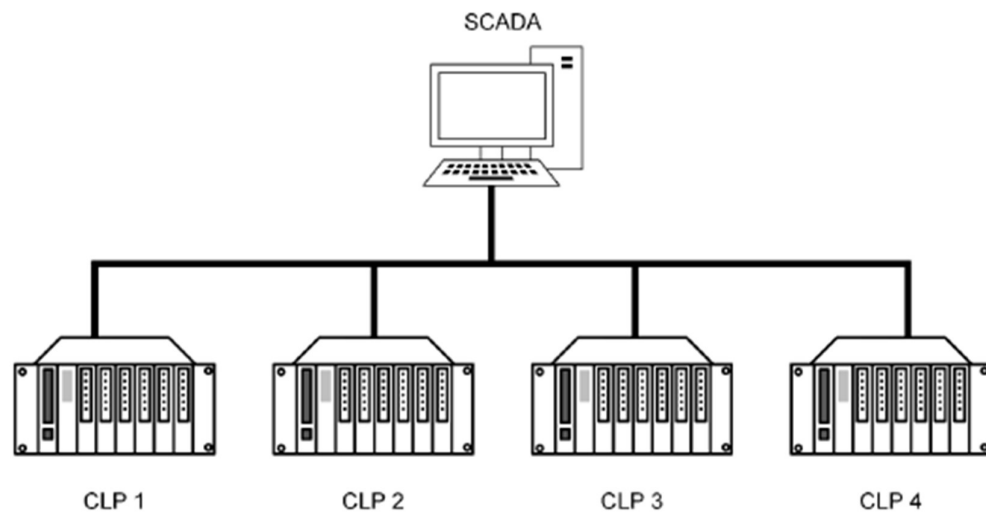


Figura 2 – Sistema SCADA comunicando-se com quatro CLPs.
Fonte: Moraes e Castrucci (2007).

2.4 REDES DE COMUNICAÇÕES INDUSTRIAIS

Uma rede de comunicação industrial pode ser definida quando alguns elementos trabalham interligados, sendo eles: computadores, CLPs, sensores e atuadores. Trocando informações com exatidão, tendo objetivo supervisionar e controlar determinado processo.

Por volta da década de 60, começou o uso de computadores para o controle de processos industriais, surgindo o *Direct Digital Control* (DDC). Nesse sistema, um computador digital, tendo função de controle e monitoração, era usado para diferentes tarefas, trazendo vantagens como rapidez e eficiência do processo, porém tinha os pontos negativos. Entre eles: exigência de profissionais mais qualificados e com conhecimentos de linguagem de programação, excesso de cabos entre o campo e a sala de controle, o que elevava de forma considerável custos de manutenção e instalação. Na figura 3 é possível observar a estrutura de um controle centralizado (DDC) (SILVA, 2011).

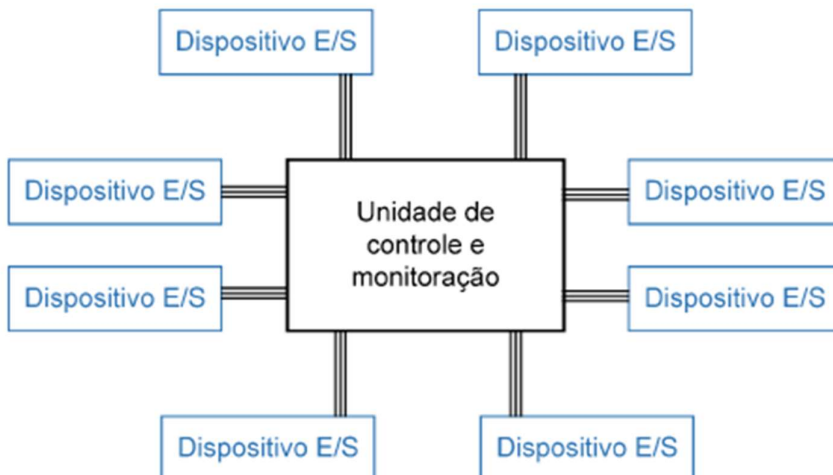


Figura 3 – Controle centralizado (DDC).
Fonte: Adaptado Moraes e Castrucci (2007).

Após o DDC desenvolveu-se sistemas de automação de barramento de campo. Onde nesse sistema a estação de controle comunica-se com os dispositivos de entrada e saída de um barramento. Tendo característica de controle centralizado, transmissão digital de dados em uma topologia de barramento e padrões RS232 ou 485 para transmissão. Por meio da figura 4, pode-se identificar a estrutura do barramento de campo.

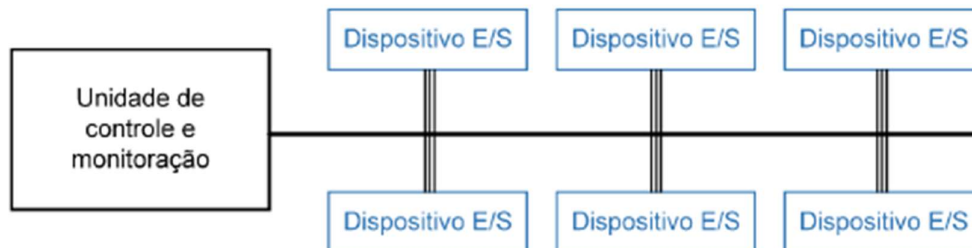


Figura 4 – Barramento de campo.
Fonte: Adaptado Moraes e Castrucci (2007).

Com o avanço da tecnologia e demanda de melhoria no mercado e no processo, desenvolveu-se outro sistema, conhecido como barramento de campo distribuído, conforme figura 5, tendo as seguintes características: redução de cabeamento e custos de instalação, unidades de conexão

(*gateways, bridges e repeaters*), inteligência distribuída com a utilização de micro controladores ao longo do barramento.

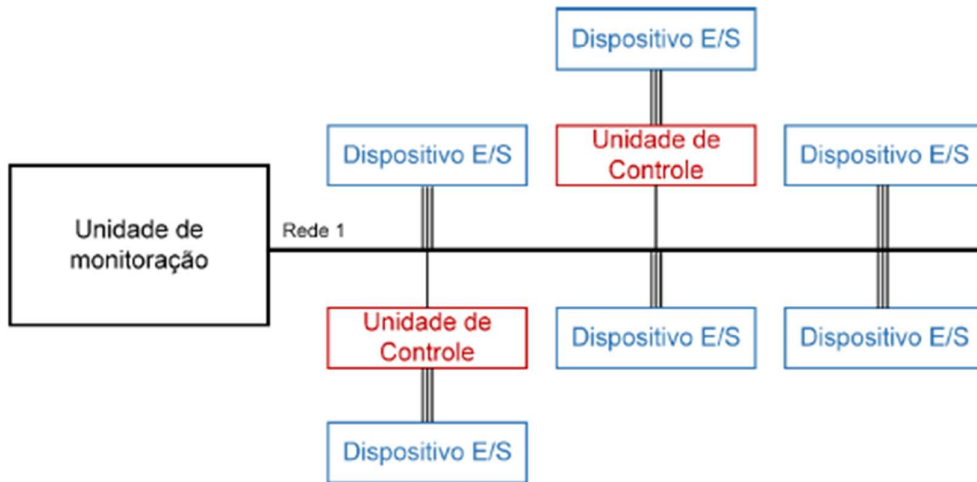


Figura 5 – Barramento de campo distribuído.
Fonte: Adaptado Moraes e Castrucci (2007).

Nos dias atuais, com melhorias dos sistemas, desenvolveram-se os chamados Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD), possuindo características como: meios variados de comunicação, implementação mais completa para sistemas abertos, flexibilidade completa para topologias de rede, softwares e ferramentas de desenvolvimento para utilização mais simplificada do operador. No SDCD, o controle não é centrado em apenas um dispositivo, mas distribuído em estações remotas, como pode-se ver na figura 6. Sendo esse sistema a base desse trabalho (Moraes e Castrucci, 2007).

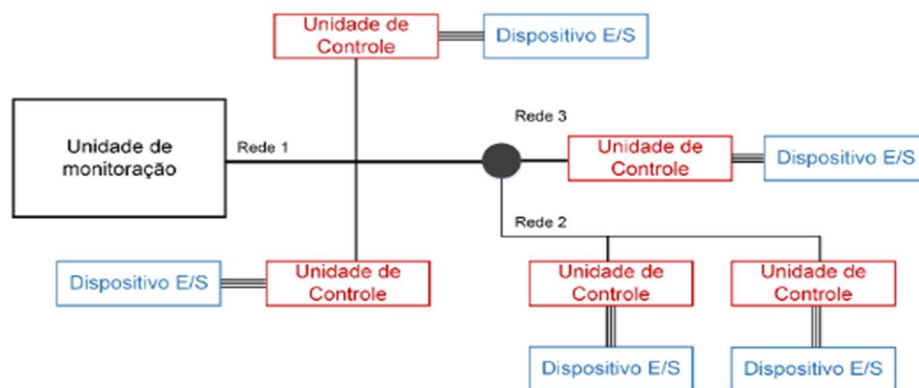


Figura 6 – Sistema digital de controle distribuído (SDCD).
Fonte: Adaptado Moraes e Castrucci (2007).

2.5 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL

Entre as tecnologias associadas ao controle industrial, as redes de comunicação são as que sofreram maiores evoluções. A utilização de redes permite a comunicação rápida e fiável entre equipamentos e o uso de mecanismos padronizados, que são hoje em dia, fatores indispensáveis no conceito de produtividade industrial (NOGUEIRA, 2009).

Pela definição protocolo é um conjunto de regras sobre a comunicação entre os elementos de uma rede industrial e sua escolha depende da aplicação. Existem diversos tipos de protocolos: HART, MODBUS, ETHERNET, PROFIBUS, entre outros (NOGUEIRA, 2009).

2.5.1 HART

O protocolo de comunicação HART® (*Highway Addressable Remote Transducer*) é reconhecido no mundo todo como um padrão da indústria para comunicação de instrumentos de campo inteligente 4-20mA, microprocessados. O Protocolo HART® permite a sobreposição do sinal de comunicação digital aos sinais analógicos de 4-20mA, sem interferência, na mesma fiação, proporcionando benefícios com outras comunicações digitais, como por exemplo o *fieldbus*, mantendo a compatibilidade com a instrumentação analógica, mais precisamente com os sistemas 4-20mA que são bem dominados na indústria da automação (CASSIOLATO, 2011)

O protocolo de comunicação de campo HART® estende o padrão 4-20mA ao permitir também a medição de processos de forma mais inteligente que a instrumentação de controle analógica, proporcionando um salto na evolução do controle de processos.

2.6 INDÚSTRIA 4.0 E IIoT

Dois conceitos que têm crescido e estão sendo muito utilizados nos últimos anos são: Indústria 4.0 e *IIoT* (*Industrial Internet of Things*). Como existe muita confusão, é importante salientar que são dois conceitos que se complementam, mas que são distintos.

Para entender da Indústria 4.0, vale voltar na história e relembrar sobre a Revolução Industrial. É fundamental entender os acontecimentos anteriores e, assim, criar uma base para entender as mudanças atuais. Tivemos 3 revoluções industriais, sendo a primeira ocorrida na Inglaterra, onde basicamente aconteceu a troca de trabalhos de artesãos para o uso de máquinas. Além do aprimoramento das máquinas a vapor, que foi o grande marco dessa primeira fase. Já a segunda revolução industrial foi marcada pela utilização da energia elétrica e combustíveis fósseis. Na terceira revolução industrial, os marcos históricos são o avanço da tecnologia: computador, evolução da eletrônica, CLP, sistemas computadorizados e internet (VENTURELLI, 2017)

A Indústria 4.0 faz menção a quarta revolução industrial que está ocorrendo. Esse conceito foi apresentado pela primeira vez durante uma feira em *Hannover*, na Alemanha, em 2011. O conceito propõe a implementação de dispositivos inteligentes no campo e fazendo uma descentralização do controle de processos. Ou seja, fazer a conexão de máquinas, sistemas e ativos e dessa forma criar redes inteligentes por toda cadeia de produção, com todo controle de processos sendo feito de forma autônoma (VENTURELLI, 2017).

Já *IIoT* pode ser definido quando se tem dispositivos, máquinas ou sensores inteligentes conectados um com o outro provendo dados relevantes para o usuário, em outras palavras, a técnica que permite conectar informações em geral de dispositivos na internet. Um exemplo na qual pode ser dado é da aplicação feita nesse trabalho. Onde o objetivo foi monitorar o consumo de ar comprimido em uma planta industrial, com medidores de vazão, medidores de pressão e um registrador.

3. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

3.1 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA

A integração proposta neste trabalho será implementada na arquitetura de um sistema digital de controle distribuído (Figura 6). Nesta arquitetura o controle não é concentrado em um dispositivo central, no entanto é distribuído em estações remotas denominadas unidades de controle, neste trabalho são representadas pelo medidor de vazão e medidor de pressão.

A comunicação se dá pelo protocolo de comunicação 4-20mA HART® e foi escolhida por ser um protocolo de fácil implementação e confiável. Como já mencionado, o protocolo HART® permite a sobreposição do sinal de comunicação digital aos sinais analógicos de 4-20mA, sem interferência. Outro ponto importante, nesse sistema a alimentação e a comunicação estão na mesma fiação, o que reduz custos de instalação. Todas as variáveis de processo são feitas pelos medidores de vazão e pressão e registradas no *Memograph*.

3.2 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO

O projeto foi implementado em uma fábrica de instrumentação no interior do estado de São Paulo. Nela têm-se 3 linhas de produção, sendo: medidores de vazão, medidores de pressão e medidores de nível. O projeto visa monitorar a distribuição e consumo do ar comprimido nessas linhas de produção conforme diagrama da Figura 7. Tendo um medidor de vazão na saída do compressor, e um par de medidores de vazão e pressão em cada uma das linhas de produção (vazão, pressão e nível). Monitorando o consumo de ar comprimido, surge a oportunidade para estudar formas de aumentar a eficiência energética da planta. A eficiência energética é um assunto muito importante, especialmente no ramo industrial. Com ela é possível economizar energia, reduzir custos operacionais, ser mais sustentável etc.

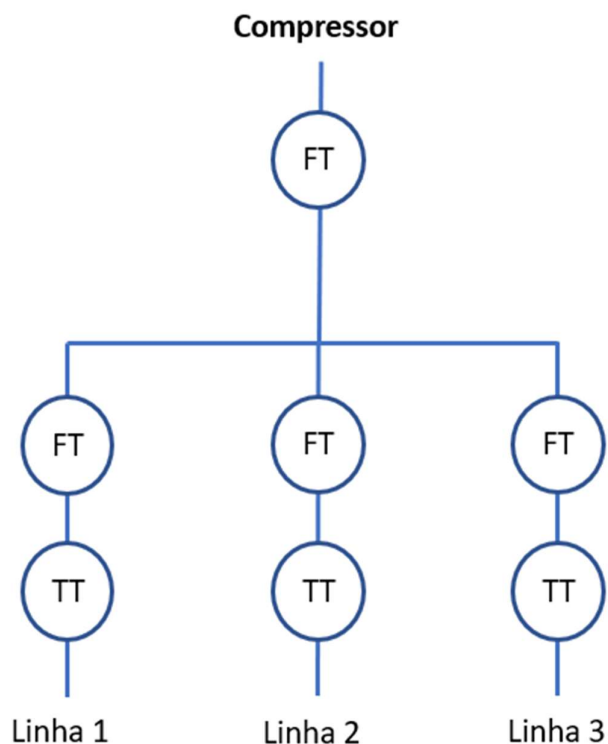


Figura 7 – Diagrama de consumo de ar comprimido
Fonte: Autoria própria

Pelo Quadro 1 se pode ver as informações técnicas dos instrumentos utilizados para realização deste projeto.

Equipamento	Fabricante	Modelo	Quantidade
Medidor de Vazão	Endress+Hauser	t-mass A 150	4
Medidor de Pressão	Endress+Hauser	Cerabar PMP71	3
Registrador	Endress+Hauser	Memograph M RSG 45	1

Quadro 1: Informações técnicas dos medidores utilizados
Fonte: Autoria própria

Dentre os medidores estão: medidores de vazão termais do fabricante *Endress+Hauser*, que por sua vez já teve seu princípio de funcionamento explanado anteriormente. Pode-se ver na Figura 8 um desses medidores já instalados.



Figura 8 – Medidor de vazão instalado na linha de ar comprimido
Fonte: Autoria própria

Como já mencionado, foi utilizado medidores de pressão do mesmo fabricante para o monitoramento desse projeto. Pode-se ver na Figura 9 um desses medidores instalados assim como suas conexões elétricas. Lembrando que o protocolo de comunicação utilizado foi 4-20mA HART, onde é possível ver uma ligação a 2 fios: os fios da ligação elétrica são os mesmos da comunicação:



Figura 9 – Medidor de pressão com sua conexão elétrica e comunicação
Fonte: Autoria própria

Por fim, para registrar e armazenar as variáveis medidas por esses instrumentos, utilizou-se o registrador *Memograph* do Grupo Endress+Hauser com um visor integrado, porém podendo ter seu controle e acompanhamento dos valores obtidos de forma remota como visto na Figura 10:

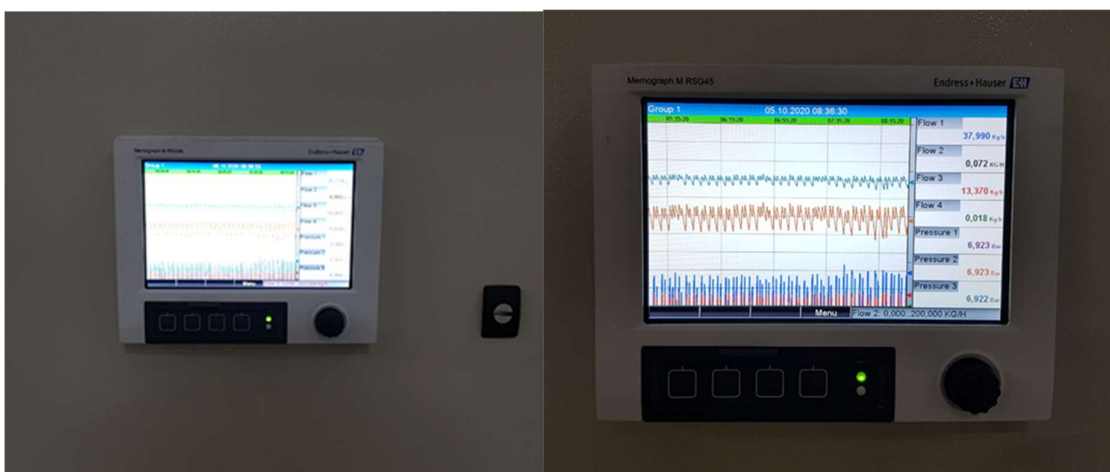


Figura 10 – Registrador com visor integrado com as medições
Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS

A proposta do trabalho é demonstrar o funcionamento da arquitetura apresentada, bem como rotinas nas quais ela pode ser utilizada.

Nos dias atuais, com os conceitos de Indústria 4.0 e IIoT, como mencionado acima, é cada vez mais importante ter todo o processo conectado, com dados de fácil acesso e em tempo real da indústria como um todo. Esses conceitos visam facilitar o dia a dia dos funcionários e operadores, além de aumentar a produtividade, eficiência e redução nos custos operacionais.

Para validar a integração proposta são realizados três testes. O objetivo destes testes é demonstrar o funcionamento da arquitetura apresentada, bem como rotinas nas quais ela pode ser utilizada, incluindo neste contexto os conceitos de Indústria 4.0 e IIoT.

4.1 TESTE FÍSICO

O objetivo deste primeiro teste é validar a arquitetura através da leitura dos valores do processo pelo Registrador. Como primeira validação da arquitetura, pode-se ver os valores sendo mostrados em tempo real no registrador utilizado.

As operações das linhas de produção devem ter seu valor de pressão em torno de 7 bar, como um fator crítico para o processo. Através da Figura 11, é possível verificar que a arquitetura está funcionando corretamente, com todos os valores de pressão próximos a 7 bar.

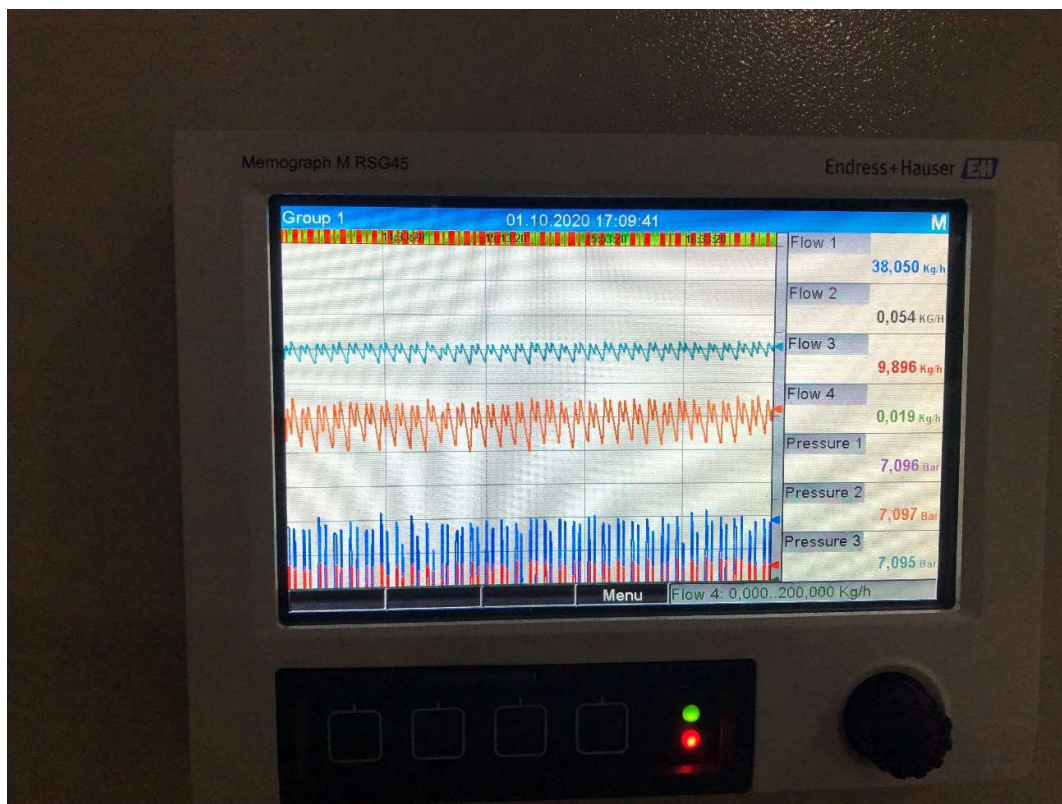


Figura 11 – Visor do Registrador com as medições sendo exibidas em tempo real
Fonte: Autoria própria

Através do Quadro 2, tem-se uma leitura dos dados apresentados na Figura 11. Onde a vazão do compressor é de 38,05 kg/h e neste momento apenas apresenta consumo na linha de vazão 3. Apesar das duas linhas restantes estarem sem consumo aparente de vazão, pode-se notar que a pressão continua 7 bar, o que é importante ao processo.

Variável	Valor medido em tempo real
<i>Flow 1</i>	38,050 [kg/h]
<i>Flow 2</i>	0,0054 [kg/h]
<i>Flow 3</i>	9,896 [kg/h]
<i>Flow 4</i>	0,0019 [kg/h]
<i>Pressure 1</i>	7,096 [bar a]
<i>Pressure 2</i>	7,097 [bar a]
<i>Pressure 3</i>	7,095 [bar a]

Quadro 2: Valores obtidos da vazão e pressão para validar arquitetura
Fonte: Autoria própria

Têm-se 4 valores para vazão e 3 valores para pressão: *Flow 1*, *Flow 2*, *Flow 3*, *Flow 4*, *Pressure 1*, *Pressure 2* e *Pressure 3*. Sendo:

- **Flow 1:** Medição de vazão na saída do compressor;
- **Flow 2:** Medição de vazão na linha de produção para medidores de vazão;
- **Flow 3:** Medição de vazão na linha de produção para medidores de pressão;
- **Flow 4:** Medição de vazão na linha de produção para medidores de nível;
- **Pressure 1:** Medição de pressão na linha de produção para medidores de vazão;
- **Pressure 2:** Medição de pressão na linha de produção para medidores de pressão;
- **Pressure 3:** Medição de pressão na linha de produção para medidores de nível.

4.2 TESTE DIGITAL

Este teste também visa validar a arquitetura proposta, mas de uma maneira digital. Para este caso, conectou-se ao registrador de forma remota, dando ênfase aos termos já abordados de Indústria 4.0 e *IIoT*. Com este teste é possível verificar se o medidor realmente está conectado ao processo, seja pelo computador ou pelo aparelho celular. Pode se verificar através da Figura 12 que o registrador utilizado neste trabalho se encontra em perfeito funcionamento.

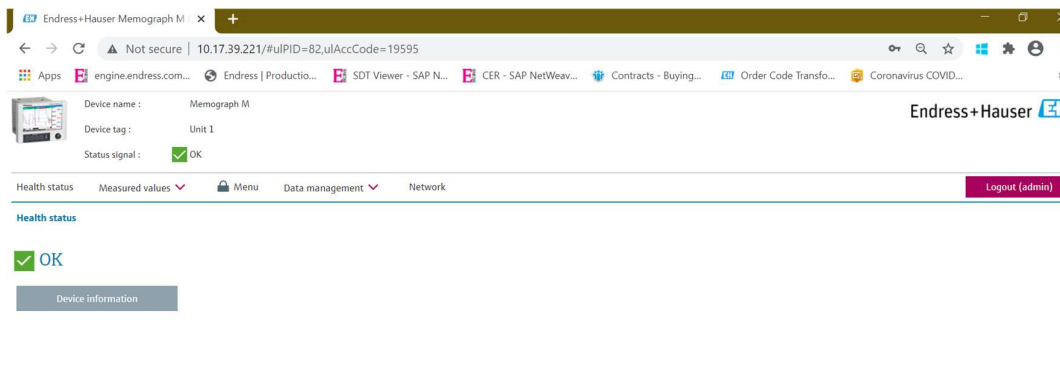


Figura 12: Verificação Remota do Registrador
Fonte: Aatoria própria

Além de verificar se o dispositivo está conectado, é possível acompanhar os dados do processo em tempo real, de qualquer lugar via *notebook* ou aparelho celular, desde que tenha conexão com a internet. Não somente monitorar e acompanhar a medição, é possível remotamente configurar definições de leitura, acessar manuais do equipamento, acessar o histórico das leituras feitas etc. Pela figura 13 se tem um exemplo da monitoração dos dados remotamente. O Quadro 3 mostra os valores exibidos na Figura 13 para uma melhor visualização.

Através do Anexo A é possível verificar como é feito esse acesso para validar o funcionamento do equipamento, bem como a visualização dos valores no processo em tempo real.



Figura 13: Acompanhamento dos dados em tempo real remotamente

Fonte: Autoria própria.

Variável	Valor medido em tempo real
<i>Flow 1</i>	0,025 [kg/h]
<i>Flow 2</i>	0,041 [kg/h]
<i>Flow 3</i>	0,091 [kg/h]
<i>Flow 4</i>	0,021 [kg/h]
<i>Pressure 1</i>	6,971 [bar a]
<i>Pressure 2</i>	6,972 [bar a]
<i>Pressure 3</i>	6,970 [bar a]

Quadro 3: Valores obtidos remotamente para validar a arquitetura proposta

Fonte: Autoria própria

Como se pode notar, é possível monitorar e acompanhar os valores do processo em tempo real de qualquer lugar. Essa é a proposta do *IIoT*, ter cada vez mais dados conectados e de forma simples e eficiente.

4.3 TESTE DE ALERTA

Não contente apenas com a monitoração e acompanhamento dos dados, um último teste foi realizado demonstrando uma possível rotina para utilização da arquitetura: definir um alarme para condições não desejadas de processo.

Para esse trabalho, foi definido um alarme para quando a pressão na linha de ar fosse menor que 6,90 bar, pois valores abaixo desse valor podem trazer problemas na linha de produção. Portanto, quando a pressão medida fosse menor que 6,9 bar, o registrador enviará um e-mail para os responsáveis. Esse alarme foi definido no próprio registrador de forma remota, como mostrado na Figura 14.

Menu > Expert > Application > Tele-Alarm > Alarm 1 (active)

Trigger	 Pressure limit 1	▼
Send to all recipients	 Yes	▼
Recipient 1	 E-mail	▼
Recipient 1 selected		▼
Recipient 2	 E-mail	▼

Figura 14: Definição de alarme remotamente no registrador
Fonte: Autoria própria.

Através da figura 15, pode-se notar o alerta recebido quando o registrador recebeu valores menores que 6,9 bar do medidor de pressão. O registrador também informa a data e o horário em que ocorreu a queda de pressão.

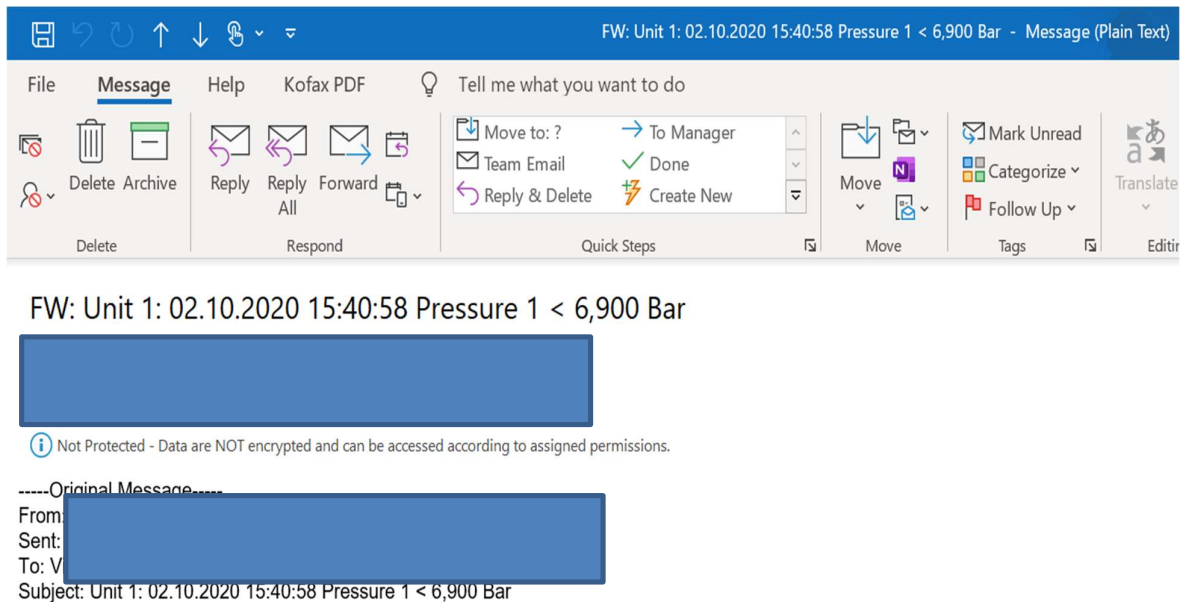


Figura 15: Email de alerta para valores pré-definidos no registrador.
Fonte: Autoria própria.

Tem-se mais um exemplo de uma possível rotina na qual é extremamente utilizada no ambiente industrial. A tendência é que os processos estejam cada vez mais conectados, com mais dados e mais informações disponíveis em tempo real.

Uma outra aplicação real desse trabalho é o acionamento do compressor quando a vazão nas linhas de produção não é suficiente para o processo requerido. Por esse motivo, também se faz a monitoração da vazão no compressor. Nesse ponto entra a eficiência energética.

Medindo o valor de vazão na saída do compressor (entrada da linha) e monitorando os valores de vazão nas três diferentes linhas de produção (saídas da linha) é possível detectar se há possíveis vazamentos, pois a soma do valor das saídas deve ser igual, ou no mínimo, próximo ao valor medido na entrada da linha (saída do compressor). Caso haja uma divergência muito grande, é possível que exista vazamentos e com isso ineficiência do sistema.

Existe uma outra possibilidade de detectar vazamentos: se o compressor for acionado em um período onde não há utilização do ar comprimido. Isto pode ocorrer caso haja uma queda de pressão na linha. Portanto, indica que podem existir pequenos vazamentos.

Para esse projeto, detectou-se que o compressor era acionado em um período de não utilização do ar comprimido. Indicando um possível vazamento. O time de serviços foi informado e iniciou as tratativas para detectar e fazer a manutenção dos vazamentos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado a integração de instrumentos de campo, mais especificamente para este projeto, foram utilizados medidores de vazão, pressão e um registrador para armazenar todos os dados. Com o objetivo de monitorar o consumo de ar comprimido de uma fábrica na qual produz esses próprios medidores. Além disso, algumas rotinas foram desenvolvidas para exemplificar os conceitos de Indústria 4.0 e *Industrial Internet of Things*.

Após estudar, instalar e configurar os medidores e o registrador, utilizando o protocolo de comunicação *HART 4-20mA*, foi possível verificar que a integração estava funcionando bem, sendo capaz de coletar os dados da unidade de controle de forma eficiente e confiável.

Como o objetivo de monitorar o consumo de ar comprimido da planta, algumas rotinas foram desenvolvidas para exemplificar na prática os conceitos de Indústria 4.0 e *Industrial Internet of Things*. A primeira rotina desenvolvida foi de acessar o registrador remotamente, para acompanhar e monitorar a medição sem estar necessariamente na planta. Basta ter um notebook ou um aparelho celular com conexão à internet. Comprovando a eficácia e mostrando a facilidade que ter uma planta conectada traz aos processos.

Para a segunda rotina foi definido um alarme de maneira remota para enviar um e-mail de alerta quando as medições atingissem um ponto crítico para o processo, nesse caso, para valores de pressão menores que 6,9 bar. Realizados alguns testes, foi possível comprovar a eficiência desse sistema. O que agrega muito valor e pode evitar perdas ou problemas maiores no processo industrial.

Por fim, com toda a medição e controle do ar comprimido, detectou-se um possível vazamento de ar em uma das linhas. Portanto, tendo a possibilidade de aumentar a eficiência energética dessa planta.

Com o exposto pode-se concluir que com a integração proposta, bem como as rotinas desenvolvidas na arquitetura, o objetivo foi atingido, uma vez que os elementos da arquitetura foram interligados fisicamente e logicamente. Apesar de um controle simples, mostra-se a eficiência e importância de ter cada vez mais o processo conectado, com mais dados e informações, facilitando o dia a dia na indústria.

REFERÊNCIAS

CAPELLI, Alexandre. **Automação Industrial: Controle do Movimento e Processos Contínuos**. São Paulo: Érica, 2006.

CASSIOLATO, César. **Redes Industriais. Artigos Técnicos Smar**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index150.html>>.

FERREIRA JÚNIOR, Milton Gontijo. **Controle de um inversor de frequência via CLP**. 2012. 39f. Termo de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia, Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro-preto, 2012.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Sistemas de Redes para Controle e Automação: Rede Industrial, Tecnologias de Controle, Meios de Transmissão, Modelo OSI Rede Fieldbus Industriais, Sistemas Residenciais e rede Ethernet**. Rio de Janeiro: Book Express, 2000.

MAINARDES, Renan. **Integração de inversores de frequência na arquitetura de um sistema digital de controle distribuído**. 2015. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio-PR, 2015.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de Automação Industrial**. – 2.ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SILVA, Lyvia Regina Biagi. **Estudo aplicado de topologias de controle de processos utilizando uma planta didática industrial**. 2011. 115 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio-PR, 2011.

SILVEIRA, Paulo Rogério da.; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e Controle Discreto**. – 4.ed. – São Paulo: Érica, 1998.

TOVAR, Eduardo Manuel de Médicis. **Suporte à Comunicação de Tempo-Real Utilizando Redes Industriais Normalizadas**. 160f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1999.

Endress+Hauser. Medidores termais de vazão mássica. Disponível em: <<https://www.br.endress.com/pt/produtos/vaz%C3%A3o/termal-vazao>>. Acesso em: 16 set 2020.

Endress+Hauser. *Absolute and gauge pressure Cerabar PMP71*. Disponível em: <<https://www.br.endress.com/pt/produtos/press%C3%A3o/Absolute-Gauge-Cerabar-PMP71>>. Acesso em: 16 set 2020.

DE ROURE, Marcel. **Instrumentação Industrial**. Disponível em: <<https://instrumentacaoecontrole.com.br/instrumentacao-industrial-guia-completo/>>. Acesso em: 11 nov 2020.

BRANDÃO, Dennis. **Redes de comunicação Industrial**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1815226/mod_resource/content/0/SEL0432_2016_Instrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 15 set 2020.

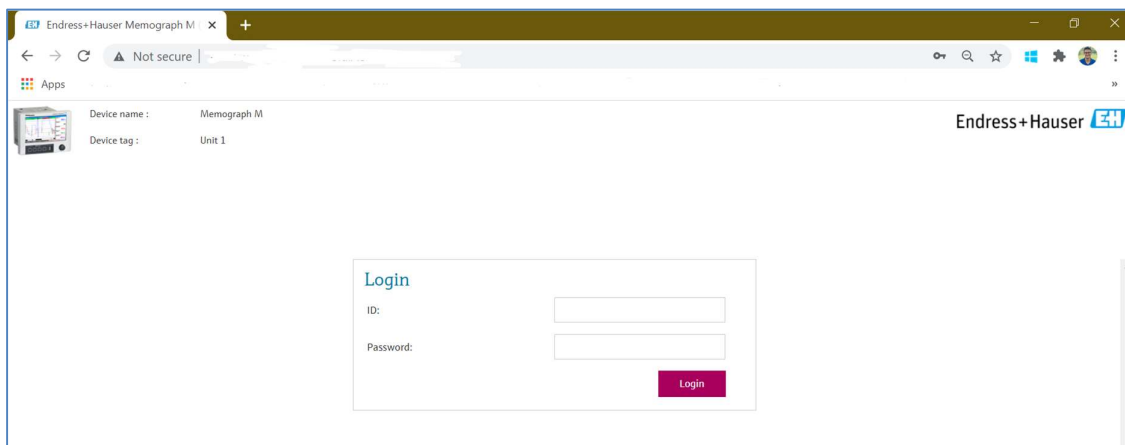
VENTURELLI, Márcio. **A Internet das Coisas na Indústria 4.0**. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/internet-das-coisas-na-industria-4-0/>>. Acesso em 15 set 2020.

ANEXO A – ACESSO REMOTO DO REGISTRADOR

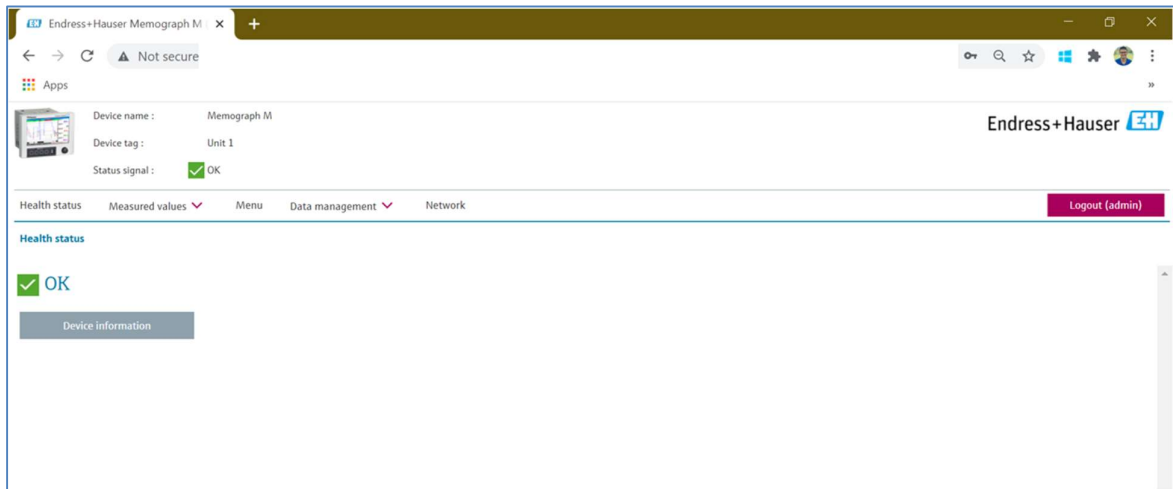
Para acessar o registrador de maneira remota, é necessário abrir uma janela do navegador de Internet e inserir o IP fornecido pelo fabricante na barra de navegação. O IP é encontrado na etiqueta junto ao medidor.



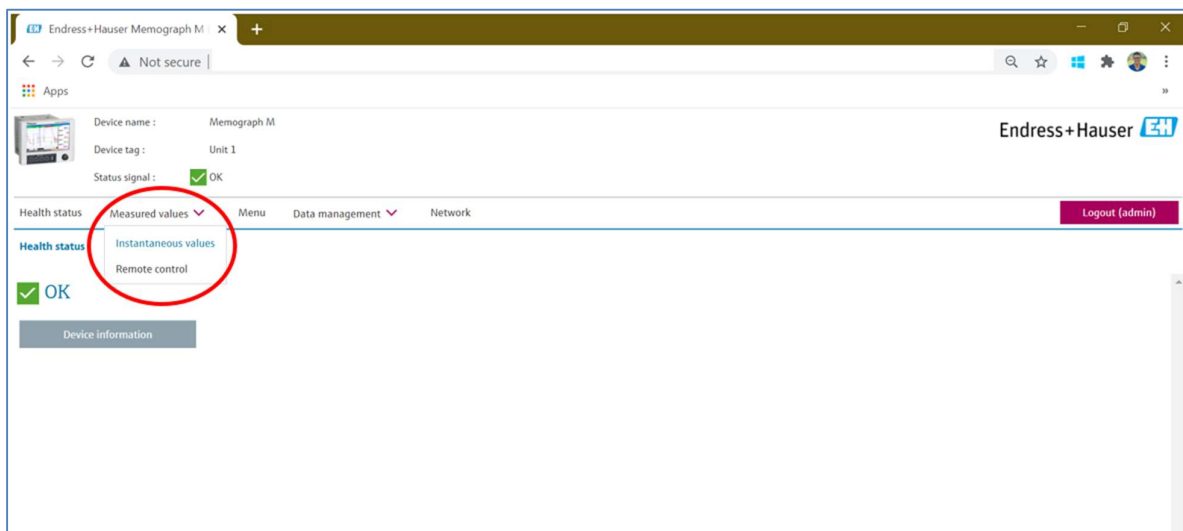
Insira o Login e a senha que também são fornecidos pelo fabricante.



Na próxima janela o status do equipamento já aparecerá no canto superior esquerdo.



Para acessar os valores, basta ir na aba “*Measured values*” e em seguida clicar em “*Instantaneous values*”



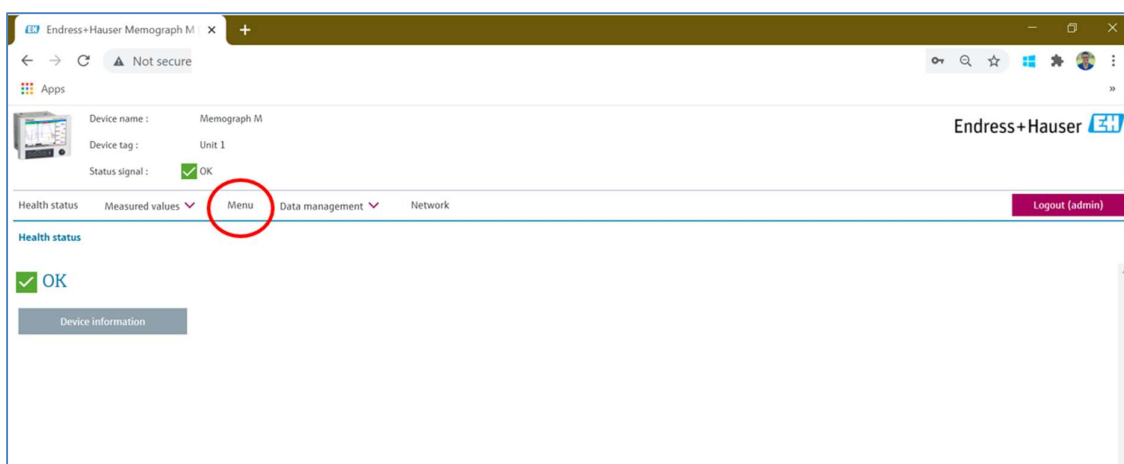
Caso queira controlar remotamente o medidor, também é possível. Apenas clicando em “*Remote Control*” na mesma aba de “*Measured Values*”.

ANEXO B – DEFINIR UM ALARME PARA PONTOS CRÍTICOS DO PROCESSO

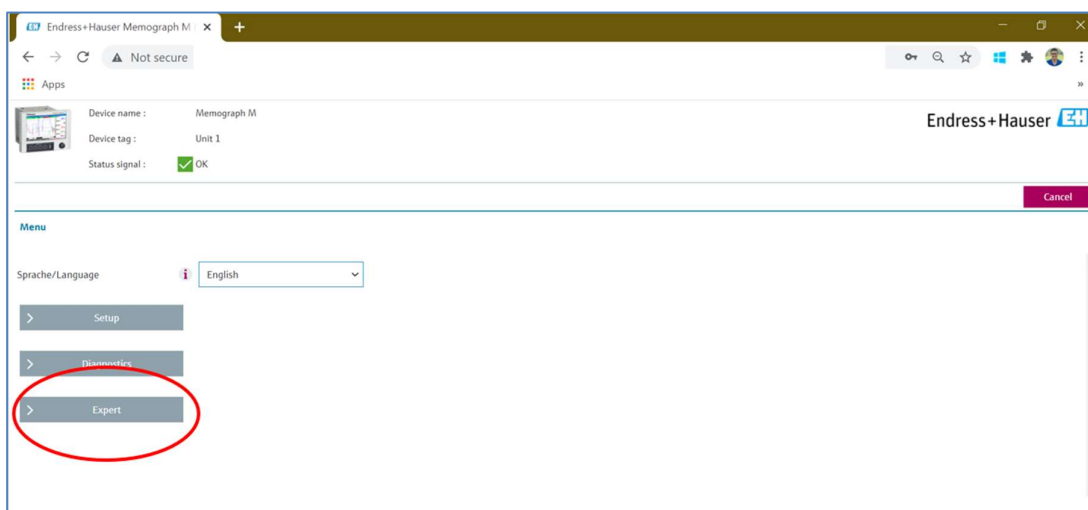
É possível definir alarmes para pontos críticos do processo. Neste anexo mostrará como definir um alarme para um ponto crítico do valor de pressão do processo.

Para acessar o instrumento, siga os passos do Anexo A para acessar o equipamento de maneira remota.

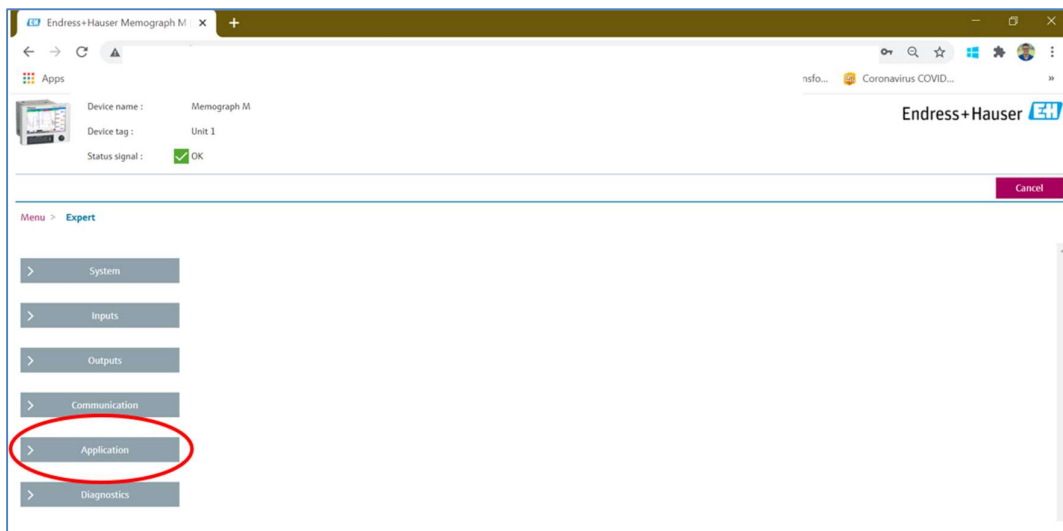
Após ter o acesso, abra a seção “Menu”.



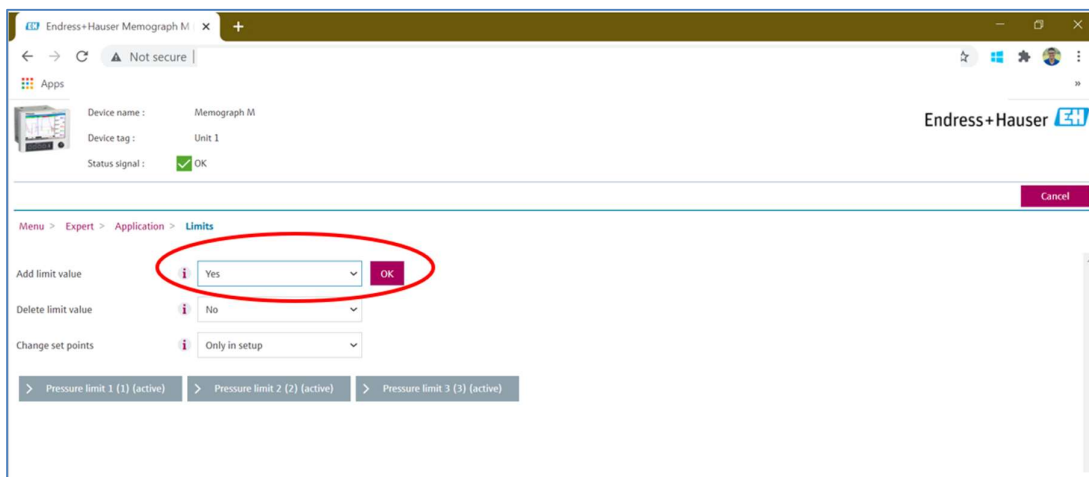
A seguir, clique na aba “Expert”.



A seguir pressione na aba “Application”.



A seguir defina “Yes” no campo “Add limit value” e pressione “Ok”.



Por fim, abrirá uma aba com campos a serem preenchidos, sendo eles para definir a variável na qual o alarme é desejado e os e-mails que deverão receber notificações quando os limites forem atingidos.