



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO LUIS DE SOUSA

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SUBSISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS PARA
INTEGRAÇÃO E SUPERVISÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM**

FLORIANÓPOLIS

2019

Gustavo Luis de Sousa

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SUBSISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
PROCESSAMENTO DE DADOS PARA INTEGRAÇÃO E SUPERVISÃO DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves
e Silva

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sousa, Gustavo

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SUBSISTEMAS DE COMUNICAÇÃO
E PROCESSAMENTO DE DADOS PARA INTEGRAÇÃO E SUPERVISÃO DE
PROCESSOS DE SOLDAGEM / Gustavo Sousa ; orientador, Régis
Henrique Gonçalves e Silva, 2018.

101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Indústria 4.0. 3. Ethernet.
Light Weigth IP. 4. ZigBee. 5. Supervisório. I. Gonçalves e
Silva, Régis Henrique . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
III. Título.

Gustavo Luis de Sousa

**Análise e Desenvolvimento de Subsistemas de Comunicação e Processamento de Dados
para Integração e Supervisão de Processos de Soldagem**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maurício Edgar Stivanello, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Raul Gohr Júnior, Dr. Eng.
IMC Soldagem

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Eng. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do Programa

Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva
Orientador

Florianópolis, 13 de abril de 2018.

Dedicado as minhas avós Duda (*in memoriam*) e Bia (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e estiveram ao meu lado neste grande desafio. Em especial:

- Ao meu orientador Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva que não enxerga limites para a pesquisa tecnológica e incentivou, orientou e possibilitou a realização deste trabalho.
- Ao meu coorientador Cleber Marques por toda disponibilidade, encorajamento e contribuições não somente a esta dissertação como também a todo o laboratório.
- Ao Raul Gohr Júnior que incansavelmente apoia o desenvolvimento tecnológico nacional e abriu portas para todo o desenvolvimento aqui realizado. Também por toda transmissão de conhecimento e confiança nesta trajetória.
- Ao Prof. Jair Carlos Dutra e ao Prof. Mateus Barancelli Schwedersky pelos conhecimentos transmitidos.
- A toda equipe da eletrônica: Fernando Costenaro, Felipe Kalil Mendonça, Ricardo Campagning, Alberto Bonamigo Viviani, Arthur Gondim e Eduardo da Luz, que fizeram prazerosa essa jornada e sempre estiveram dispostos a ajudar em qualquer desafio.
- Aos demais membros do LABSOLDA: Luciano Cirino, Cassiano Godinho, Luiz Paes, Francisco Sartori, Daniel Cristiano Ferrari, Marcelo Pompermaier Okuyama, Rafael Bernardi, Kauê Riffel, Renan Kindermann, Hellinton Direne, Eduardo Bidese Puhl, Jônathas Alexandre Alves, Rafael Costa Barbosa, Cleber Guedes, João Facco de Andrade, Rafael Gomes Nunes Silva, Ramon Natal Meller, Mário Nascimento, Maicon Claudio Elias, Fernando Lucas dos Santos e Silva, Daniel Galeazzi, Douglas Ferronato Tavares, Victor José Pereira que elevaram o nome do laboratório baseado na cooperação e amizade.
- Aos meus grandes amigos Leonardo Santana, Matheus Santos da Silva e Wellington Pereira Jr.
- À toda minha família. Em especial aos meus pais e minha namorada Jéssica pelo amor incondicional.
- Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC e ao FINEP pelo apoio financeiro.

O verdadeiro homem mede a sua força, quando se defronta com o obstáculo.
(Antoine de Saint-Exupéry, 1943)

RESUMO

Os desenvolvimentos tecnológicos atuais vêm acontecendo em escala exponencial ao ponto de as máquinas serem enxergadas como peças inteligentes dentro de um grande sistema de produção. Essa é uma das características da Indústria 4.0 que integrando *Internet of Things* (IoT), *Internet of Services* (IoS), Big Data e virtualização têm influenciado não somente a maneira como a produção industrial acontece, mas também como são desenhados os modelos de negócio da indústria. Na soldagem, esses avanços vêm se constituindo principalmente na integração de subsistemas como sensores, robôs, supervisorio, fontes de energia, etc., com o objetivo de se obter resultados de solda íntegros, operações seguras, documentação fiel e rastreabilidade do processo. Neste contexto, o LABSOLDA vem realizando diversos avanços em inovações nacionais e executando projetos de P&D, que inclusive, envolvem empresas dos setores tanto de petróleo e gás como também de máquinas e equipamentos. O SISASOLDA é um desses projetos, o qual este trabalho é inserido, e conta como interveniente a empresa IMC Soldagem, spin-off do LABSOLDA, que tem contribuído com seus produtos na área de fontes de energia e de robótica, possibilitando a criação de sistemas avançados de soldagem. Nesse meio, o objetivo deste trabalho é estabelecer uma abordagem para a integração e supervisão de processos de soldagem em equipamentos nacionais utilizando redes de comunicação cabeada, também considerando e avaliando tecnologias sem fio acerca de suas capacidades e limitações com foco em sistema fonte de soldagem-robô manipulador. Esses sistemas, predominantemente microprocessados, demandaram um embasamento multidisciplinar envolvendo áreas como mecânica, elétrica, eletrônica e TIC (tecnologia da informação e comunicação) que foi substancialmente exigido nas produções dos resultados tanto em nível de hardware, pelo desenvolvimento de circuitos e modificações eletrônicas, quanto em nível de *firmware* e software. Como resultados do trabalho, obteve-se a geração de bibliotecas e ferramentas para a comunicação em rede de microprocessadores STM32F4-Discovery utilizando-se do protocolo Ethernet em conjunto a LwIP. Também foram avaliados os protocolos ZigBee e Wifi para comunicação sem fio, além do desenvolvimento de um software de supervisão, denominado Connect, que permitiu controle e acesso aos dados das fontes de soldagem da IMC. Não obstante, para o funcionamento, ainda que parcial, da comunicação em rede de fontes ainda não atualizadas tecnologicamente com o microcontrolador STM32F4-Discovery, foi desenvolvido e implementado um Gateway Ethernet, que tem por função permitir a comunicação via rede com as fontes de soldagem por meio do atual protocolo de comunicação RS-232 disponível. Alguns resultados ainda foram implementados em projetos especiais e da empresa IMC que pode validar industrialmente os recursos desenvolvidos.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Ethernet. Light Weigth IP. ZigBee. .

ABSTRACT

Current technological developments have been happening on an exponential scale to the point where machines can be seen as intelligent parts within a large production system. This is one of the characteristics of Industry 4.0 that integrating Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS), Big Data and virtualization have influenced not only the way industrial production happens, but also the way industry business models is designed. In welding, these advances have been mainly constituted by the integration of subsystems such as sensors, robots, supervisory, energy sources, etc., with the objective of obtaining complete welding results, safe operations, faithful documentation and traceability of the process. In this context, LABSOLDA has been making several advances in national innovations and executing R&D projects, which also involve companies from the oil and gas sectors as well as machinery and equipment. The SISASOLDA is one of these projects, in which this work is inserted, with the IMC Soldagem Company, a LABSOLDA spin-off, as an intervener, which has contributed with its products in the area of energy sources and robotics, making possible the creation of advanced welding systems. In this context, the objective of this work is to establish an approach for the integration and supervision of welding processes in national equipment using wired communication networks, also considering and evaluating wireless technologies about their capabilities and limitations with focus on welding source- manipulator robot. These predominantly microprocessed systems required a multidisciplinary background involving areas such as mechanics, electrical, electronics and ICT (information and communication technology) that were substantially required in the production of results both at the hardware level, the development of circuits and electronic modifications, and at the firmware and software level. As results of the work, was obtained a generation of libraries and tools for the network communication of STM32F4-Discovery microprocessors that uses Ethernet protocol in conjunction with LwIP. Were also evaluated the ZigBee and WiFi protocols for wireless communication, as well as the development of supervisory software, called Connect, which allowed control and access to the data of the welding sources of the IMC Soldagem. Nevertheless, an Ethernet Gateway was developed and implemented for the operation, even partially, of network communication of sources not yet technologically updated with the microcontroller STM32F4-Discovery, whose function is to allow network communication by current RS-232 communication protocol. Also, was implemented some results in special projects and the IMC Company could validate industrially the developed resources.

Keywords: Industry 4.0. Ethernet. Light Weigth IP. ZigBee. Supervisory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Revoluções industriais. Adaptado de Kagermann et al [5].....	28
Figura 2 - IHM da Fonte Kemppi X8 com comunicação Bluetooth.	30
Figura 3 - Comparação entre o modelo de referência OSI e o modelo de referência TCP/IP .	31
Figura 4 - Comparação entre arquiteturas de rede.....	32
Figura 5 - Cabo com par trançado e conector RJ45.	33
Figura 6 - Ruído de chaveamento sobre o sinal gerado.....	41
Figura 7 - Fonte multiprocessos IMC Digiplus A7. Fonte: Manual de Instruções [50].....	46
Figura 8 - Manipulador Tartílope V4. Fonte: SPS – Sistemas e Processos de Soldagem [51].	47
Figura 9 - Sistema de aquisição portátil	48
Figura 10 - STM32F4-Discovery	48
Figura 11 - DP83848 Ethernet Board	49
Figura 12 - a) Módulo XBee ZigBee TH (wire antenna). b) Módulo XBee ZigBee PRO TH (wire antenna).....	50
Figura 13 - Topologia para validação.....	56
Figura 14 - Placa de interface entre Tartílope V4 e STM32F4-Discovery. Vista superior e inferior, respectivamente.	56
Figura 15 - Comparação entre as bibliotecas de programação. (a) HAL. (b) STD. (c) CMSIS.	57
Figura 16 - Chip DP83848 do módulo PHY com o pino de interrupção [53].....	59
Figura 17 - Módulo PHY com a conexão do pino de interrupção.....	60
Figura 18 - Tempo médio de resposta em comunicação de um único cliente TCP com pacotes de diferentes tamanhos	61
Figura 19 - Tempo médio de resposta em comunicação de 5 clientes simultâneos TCP com pacotes de diferentes tamanhos	62
Figura 20 - Tempo médio de resposta em comunicação de um único cliente TCP com pacotes de diferentes tamanhos	63
Figura 21 - Software XCTU de configuração dos módulos XBee ZigBee.	64
Figura 22 – Ensaio com 3 módulos XBee ZigBee.	65
Figura 23 - Comunicação wireless substituindo comunicação serial cabeada	66
Figura 24 - Sistema Gateway Ethernet.....	67
Figura 25 - Diagrama de envio de mensagens pela fonte.....	70
Figura 26 - Diagrama do recebimento de mensagens pela fonte.....	70

Figura 27 – Requisição do endereço de IP do Gateway Ethernet conectado na rede. a) Endereço de IP. b) Endereço MAC. c) Descrição da fonte/Gateway Ethernet.....	74
Figura 28 - Bancada de ensaio com a giga de testes (A). Computador (B) e Gateway Ethernet (C) conectados a um roteador (D).....	74
Figura 29 – Detalhe da aquisição do processo MIG CCC por meio do Gateway Ethernet.....	75
Figura 30 - Perda de dados de aquisição devido a pausa gerada por outros tipos de solicitações.	76
Figura 31 - Aquisição do processo MIG CCC por meio do Gateway Ethernet.....	76
Figura 32 - Tela principal do Connect.	78
Figura 33 - Tela "Dispositivos" com três fontes cadastradas.....	79
Figura 34 - Tela para adição de dispositivos.....	80
Figura 35 - Tela em uma nova janela com as informações do dispositivo selecionado.	81
Figura 36 - Submenu "Acesso Remoto".	81
Figura 37 - Tabelas do banco de dados.....	83
Figura 38 - Disposição dos componentes na união de tubos	84
Figura 39 - Ensaio com soldagem e comunicação Wifi.....	85
Figura 40 – Sistema de Nitretação por PLASMA.....	87
Figura 41 - Sistema de Rastreabilidade do Processo de Soldagem. a) Microcontrolador utilizado neste trabalho com o protocolo Ethernet e pilha LwIP implementada. b) PC industrial comunicando via Ethernet com o microcontrolador. c) IHM <i>touchscreen</i>	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
AWS	<i>American Welding Society</i> / Sociedade Americana de Solda
API	<i>Application Programming Interface</i> / Interface de Programação de Aplicativos
CMD	byte de um frame a comando
ID	byte de um frame a função de identificador
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i> / acesso múltiplo ao meio com detecção de colisão
CPU	<i>Central Processing Unit</i> / unidade central de processamento)
CI	Circuito Integrado
CIP	<i>Common Industrial Protocol</i>
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CMSIS	<i>Cortex Microcontroller System Interface Standard</i>
CCC	Curto-Circuito Controlado
DMA	<i>Direct memory access</i> / acesso direto à memória
DNS	<i>Domain Names Resolver</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
EPS	Especificações de Procedimento de Soldagem
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
I/O	<i>Input Output</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> / Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IDE	<i>Integrated Sevelopment Environment</i> / ambiente de desenvolvimento integrado)
IA	Inteligência artificial

IHM	Interfaces homem-máquina
EMI	Interferências eletromagnéticas
I2S	<i>Inter-IC Sound</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization /</i> Organização Internacional de Normalização
IoS	<i>Internet of Services</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
lwIP	<i>Light Weight Internet Protocol</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit /</i> unidade de microcontrole
MAC	<i>Medium Access Control</i>
NAT	<i>Network address translation</i>
ODVA	<i>Open DeviceNet Vendor Association</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
P,D&I	Pesquisa, desenvolvimento e inovação
RTOS	<i>Real Time Operation Systems</i>
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
SIG	<i>Special Interest Group</i>
STD	<i>Standard Peripheral Libraries</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol /</i> Protocolo de Controle de Transmissão
USART	<i>Universal synchronous and asynchronous</i> <i>receiver-transmitter</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS.....	25
1.1.1	Objetivos Específicos.....	25
2	CONTEXTUALIZAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA.....	27
2.1	MANUFATURA AVANÇADA E INDÚSTRIA 4.0.....	27
2.2	REDES	30
2.2.1	Ethernet.....	32
2.2.2	Light Weight IP	34
2.2.3	Fieldbuses	35
2.2.3.1	DeviceNet.....	35
2.2.3.2	ControlNet.....	36
2.2.3.3	Ethernet/IP.....	36
2.2.3.4	Modbus TCP.....	36
2.2.3.5	PROFINET	37
2.2.4	WiFi	37
2.2.5	Bluetooth	39
2.2.6	ZigBee	39
2.3	FONTES DE SOLDAGEM	40
2.4	MANIPULADORES.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS	43
3.1.1	Análise de requisitos.....	45
3.2	MATERIAIS	46
3.2.1	Fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7.....	46
3.2.2	Robô manipulador SPS Tartílope V4.....	47
3.2.3	Sistema de Aquisição Portátil.....	47
3.2.4	Unidade de microprocessamento	48
3.2.5	Dispositivos de rede	49
3.2.5.1	Rede cabeada.....	49
3.2.5.2	Rede sem fio.....	49
3.2.6	Ferramentas de desenvolvimento e análise.....	51
3.2.6.1	Keil μ Vision	51

3.2.6.2	Microsoft Visual Studio.....	51
3.2.6.3	Wireshark.....	52
3.2.6.4	DB Browser for SQLite	52
3.3	MÉTODOS	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES SELECIONADOS PARA O TRABALHO.....	55
4.1.1	STM32F4-Discovery	55
4.1.1.1	Bibliotecas para programação.....	56
4.1.1.2	Interrupções	57
4.1.1.3	Reconhecimento de conexão do cabo Ethernet	59
4.1.2	Light Weight IP.....	60
4.1.3	ZigBee	63
4.1.3.1	Ensaio rede ZigBee em malha	64
4.1.3.2	Ensaio rede ZigBee no modo ponto-a-ponto	65
4.2	DESENVOLVIMENTO DE UM GATEWAY ETHERNET	67
4.2.1	Protocolo de comunicação da fonte Digiplus A7.....	67
4.2.2	Firmware Gateway Ethernet para STM32F4-Discovery	69
4.2.2.1	Sentido de comunicação RS-232 para Ethernet.....	71
4.2.2.2	Sentido de comunicação Ethernet para RS-232.....	72
4.2.2.3	Estabelecimento de conexão entre dispositivos (PC e fonte)	72
4.2.3	Ensaio com Gateway Ethernet.....	74
4.3	DESENVOLVIMENTO DO SUPERVISÓRIO	77
4.3.1	Concepção e funcionamento	78
4.3.2	Banco de dados.....	82
4.4	INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES COM SISTEMA WIFI.....	83
4.5	OUTROS RESULTADOS	86
4.5.1	Sistema de Nitretação por PLASMA	86
4.5.2	Sistema de Rastreabilidade do Processo de Soldagem	88
5	CONCLUSÕES.....	91
5.1	TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

Os ambientes de soldagem vêm cedendo cada vez mais espaço para as tecnologias de integração entre os equipamentos, contudo, os fabricantes desenvolvem protocolos próprios que só promovem benefício próprio no intento da comercialização de soluções prontas. Mesmo com a iniciativa de organismos para padronizar tais evoluções, como o comitê A9.4 da AWS e a associação de fabricantes da Open DeviceNet Vendor Association (ODVA), ainda não existe um consenso por parte dos especialistas, usuários, integradores e dos próprios fabricantes quanto as melhores técnicas para o trabalho cooperativo de componentes de soldagem [1]. Segundo Romano [2], é quase consenso que uma boa integração do robô, por exemplo, com os demais artefatos de um processo de fabricação é a base para o uso racional e mais proveitoso dos mesmos, permitindo maior flexibilidade de ação nos ambientes de produção. Em contrapartida, a cada momento surgem novas tecnologias que apresentam melhor performance, custos baixos e que precisam de avaliação para que possam ajudar com melhores desempenhos na indústria e se consagrando como um novo padrão a ser adotado.

Com a grande demanda na indústria de petróleo e gás, o setor de soldagem obteve grandes aumentos na solicitações de avanços tecnológicos, se tornando um dos principais gargalos desse setor produtivo. Na busca de soluções para o problema, fica evidenciada a necessidade de automatização dos processos e, conseqüentemente, do desenvolvimento e emprego da integração entre equipamentos e periféricos, o que valida as afirmações de Rippey [1]. Neste âmbito, surgem projetos que se propõem a encontrar e avaliar tecnologias que, neste ramo de atividade, ainda são bastante escassas em nosso país.

O Instituto de Soldagem e Mecatrônica (LABSOLDA) da Universidade Federal de Santa Catarina vem realizando diversos avanços no que diz respeito a inovações nacionais em muitas das searas da soldagem a arco voltaico. Neste contexto, o presente trabalho se introduz em um projeto de pesquisa e desenvolvimento de um sistema avançado de soldagem, denominado SISASOLDA, que tem por objetivo oferecer condições para a integração de subsistemas e para a inovação de operações de soldagem buscando se obter maior produtividade, qualidade e padronização dos procedimentos [3]. O projeto prima por aliar o sensoriamento, mecanização, parâmetros de soldagem e rastreabilidade dos processos por meio de tecnologias de comunicação que possam elevar o patamar das tecnologias nacionais. Como principais parceiros do projeto podem-se destacar as empresas IMC – Engenharia de Soldagem e SPS – Soluções para Soldagem, spin-offs do LABSOLDA que, ao longo de sua história tem

contribuído para aumentar o potencial do país com seus produtos na área de fontes de energia e de robótica, possibilitando a criação de sistemas avançados de soldagem.

Em se tratando de sistemas avançados de soldagem, constituídos por subsistemas como sensores, robôs, supervisorio, fontes de energia, atuadores e etc., é imperativo que haja consistente integração entre as partes. Para que se alcancem os resultados desejados (solda íntegra, operação segura e documentação fiel), deve haver sincronização e intercomunicação entre os componentes (triggers, temporizadores, controladores, intertravamento, ...). Sistemas isolados não permitem adequada repetibilidade, tampouco robustez do processo. Naturalmente, existem diferentes níveis de complexidade de integração, mas uma mínima capacidade de interconexão deve estar presente.

De qualquer modo, se nota a inserção do trabalho em uma das mais importantes tendências tecnológicas da atualidade, a Indústria 4.0. Esse movimento mundial que, por vezes, é classificado como a 4ª revolução industrial, diz respeito a digitalização dos processos de manufatura, interconexão entre subsistemas e processamento cooperativo de dados em larga escala (Big Data).

No caso do presente trabalho, as problemáticas encontradas nas ações para integração de subsistemas de manufatura da soldagem são: desenvolvimento e implementação de protocolos e bibliotecas de programação em sistemas embarcados, compatibilidade das novas tecnologias em equipamentos já existentes (fonte de soldagem) e desenvolvimento de software de controle e supervisão de fonte de soldagem. Cabe ressaltar que, em se tratando de soldagem, toda a gama de soluções destinada a comunicação entre dispositivos está sujeita a operação em condições hostis de trabalho, com evidentes possibilidades de interferências eletromagnéticas provocadas pelas altas intensidades de corrente do processo.

Sob a ótica do contexto apresentado, o presente trabalho aborda estudos que avaliam o desempenho e emprego de diferentes tecnologias de comunicação, sejam estas cabeadas ou não (*wireless*). Em decorrência de sua maior aplicabilidade na indústria, convergência das tecnologias para protocolos já consolidados em outras áreas não industriais, com conseqüente menor custo e disponibilidade de conhecimento, tem-se como foco de estudo a arquitetura do tipo Ethernet assim como o conjunto de especificações para comunicação sem fio entre dispositivos denominado de ZigBee.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma abordagem de integração e supervisão de processos de soldagem em equipamentos nacionais utilizando redes de comunicação cabeadas, considerando também o uso de tecnologia sem fio, avaliando suas capacidades e limitações, com foco no sistema fonte de soldagem e robô manipulador. Visa-se, para isso, investigar e selecionar tecnologias de comunicação que atendam as demandas dos processos de soldagem, possibilitem avanços na integração de componentes e soluções para soldagem.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para que seja possível a realização do objetivo exposto, se faz necessário o cumprimento de itens específicos, como:

- Definir requisitos para as redes a serem desenvolvidas / aplicadas para sistemas de soldagem considerados no escopo do trabalho.
- Pesquisar, selecionar tecnologias e implementar uma rede cabeada local em células de soldagem para promover acesso a informações da planta e interfacear com sistemas de gerenciamento de produção. A rede deve ser compatível com os principais componentes da planta mecanizada utilizada neste trabalho, sendo estes a fonte de soldagem e o robô manipulador.
- Avaliar e desenvolver hardware embarcado para aplicação das tecnologias de rede e controle.
- Pesquisar, selecionar e avaliar o uso de rede sem fio em células de soldagem. Neste item, se faz necessária uma caracterização da rede sem fio para que se possa definir as aplicações que venham a utilizar deste recurso na célula de soldagem.
- Realizar uma análise quanto ao uso deste tipo de rede tendo em vista a hostilidade do ambiente, já que o mesmo apresenta campos magnéticos elevados, ruídos intensos e barreiras de sinal característica do meio industrial.
- Desenvolver um software que permita o interfaceamento, configuração e aquisição de informações da planta. Destaca-se a necessidade de uma ferramenta com interface amigável nos padrões das aplicações atuais e a importância da disponibilização de informações do processo ao usuário final.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA

A complexidade da indústria atual e sua busca constante por adaptação ao mercado e aumento de competitividade cria uma demanda por tecnologias cada vez mais avançadas. Isto exige que equipes de projeto tenham características multidisciplinares que possam abranger desde especialistas em ergonomia até desenvolvedores em inteligência artificial. Ou seja, com o intuito de abarcar a quantidade de informações disponível em cada área do conhecimento, necessárias para o desenvolvimento de um projeto, equipes de trabalho compostas de especialistas de diversas áreas há muito deixaram de ser exceção para se tornar regra.

O mesmo cenário relatado é verdadeiro para a área de soldagem. Hoje em dia, o desenvolvimento de equipamentos para soldagem (fontes de soldagem, sensores, manipuladores, etc.) exige, no mínimo, conhecimentos de mecânica, elétrica, eletrônica e informática. Esta integração de subdomínios, em conjunto a aquisição, disponibilização e processamento coletivo de dados em larga escala rege a capacidade das plantas de produção em atender demandas sempre crescentes de elevada produtividade e qualidade. A este cenário de transformação disruptiva dos processos de fabricação se atribuiu a designação de Manufatura Avançada, ou Indústria 4.0.

Este trabalho, por se inserir nesse contexto, se embasa nas grandes áreas supracitadas e apresenta neste capítulo informações acerca da indústria e a evolução tecnológica em curso, fundamenta alguns protocolos de rede que são objetos de estudo nesse trabalho ou que servirão como comparativo tecnológico e também contextualiza o estado da arte em fontes de soldagem e manipuladores.

2.1 MANUFATURA AVANÇADA E INDÚSTRIA 4.0

Atualmente, os desenvolvimentos tecnológicos acontecem em escala exponencial e trouxeram um momento em que as máquinas podem ser enxergadas como uma peça inteligente dentro um grande sistema [4]. Os últimos grandes passos da indústria foram tratados como as “Revoluções Industriais”, passando a receber essa denominação sempre de forma vinculada a algum grande evento que de fato inovou e mudou completamente a forma como as indústrias funcionavam. Pode-se destacar os pontos principais das revoluções como: o surgimento das máquinas a vapor na primeira revolução; a criação do motor elétrico na segunda revolução industrial; e a aplicação da informática industrial na terceira revolução (Figura 1).

A Indústria 4.0 é tratada antecipadamente como a quarta revolução industrial e tal fato se deve principalmente pela inteligência que está sendo embarcada nas máquinas atuais (IoT – *Internet of Things*), por toda a infraestrutura de tecnologia de informação e comunicação que se relacionam a estas máquinas, e também pelo desenvolvimento dos processos que estão vinculados a elas (IoS – *Internet of Services*) [5]. Empresas de tecnologia conseguem se destacar inclusive em ramos que não eram muito tradicionais, como a Google que começou a investir em carros autônomos e, segundo informações do *Wall Street* [6], já possui valor de mercado que passa o dobro de empresas como BMW, Volkswagen e Daimler (Mercedes-Benz) combinadas.

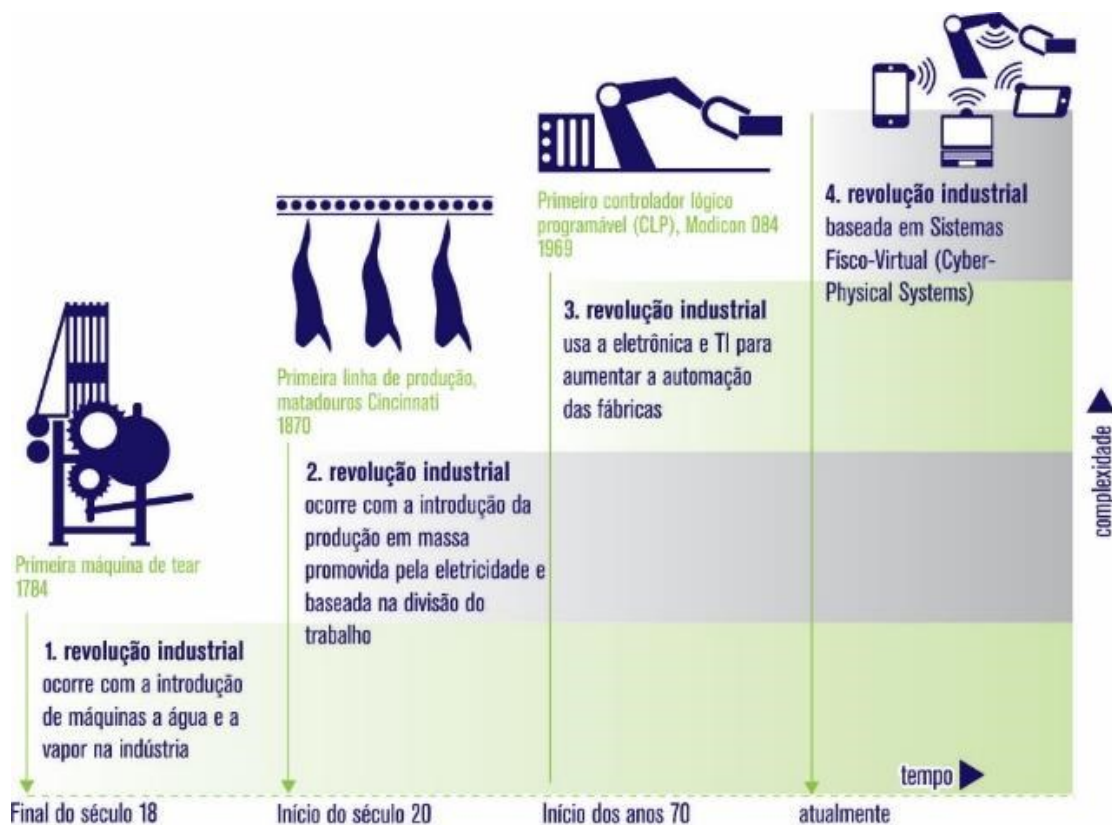


Figura 1 - Revoluções industriais. Adaptado de Kagermann et al [5].

Hermann et al [7] fizeram um estudo para levantar as principais características e melhor definir a Indústria 4.0. Um dos pontos abordados trata da questão da descentralização. Nesses casos, as máquinas podem assumir funções como, por exemplo, informar em tempo real ao ecossistema sobre sua capacidade de produção, ou ainda comandar outras máquinas para que as alimentem ou forneçam os suprimentos necessários para que a produção não seja interrompida. Outra característica importante é a modularidade, que é a capacidade de produzir

sobre demanda, acoplando ou desacoplando módulos produtivos à planta. Isto implica também em outra característica, a flexibilização das máquinas para que atendam diversos processos da produção. Também faz parte da Indústria 4.0 a virtualização, onde uma cópia virtual da planta constantemente atualizada por sensores e permitem simulações e geração dos próximos processos e tomadas de decisão que serão executados na planta.

Gilchrist [8] afirma que um dos fatores que tornou possível a Indústria 4.0 foi a evolução dos sensores, por exemplo, que não mais geravam somente dados das medições, mas também transmitiam informações como seus dados de calibração, sua vida útil ou avaliações sobre suas medidas comparadas a valores pré-definidos. Além disso, esses dispositivos tiveram seus preços e tamanhos reduzidos assim como os custos inerentes à outras áreas como computação, armazenamento e de redes. Estes últimos, especificamente os de rede sem fio de baixa potência, antes eram inviáveis e agora já são utilizados para monitoramento e controle.

Atualmente, em sistemas e equipamentos dedicados à soldagem esta tendência também vem se fazendo presente, sendo encontradas diversas soluções focadas na Indústria 4.0. As maiores iniciativas de pesquisa são nas áreas de comunicação com e sem fio, sistemas de supervisão e armazenamento de dados com vistas a funções de rastreabilidade [9][10]. Estas soluções são encontradas em soldagem na forma de produtos como geradores de trajetórias para robôs em ambiente de realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR); banco de dados em nuvem com informações detalhadas dos processos das plantas a nível de máquina, ou seja, dados de status, parâmetros de processo durante sua execução, entre outros (big data); soluções de suporte e manutenção remota pelos fabricantes aos equipamentos proporcionada pela conectividade; além de soluções em processos avançados com uso de inteligência artificial [11].

Alguns fabricantes no intuito de acelerar sua inserção nesse movimento de evolução tecnológica estão trazendo para seus produtos as soluções mais difundidas de comunicação, como a Ethernet, Bluetooth [12] (Figura 2), Wi-Fi [13][14] e ZigBee. Essas tecnologias, apesar de não serem desenhadas para o meio industrial, estão sendo adotadas por possuírem um maior conhecimento difundido, pelo custo dos equipamentos, pelo custo de implantação e etc., tudo isso relacionado com aos requisitos das aplicações e da capacidade dessas tecnologias.



Figura 2 - IHM da Fonte Kemppi X8 com comunicação Bluetooth.

2.2 REDES

No início da popularização dos computadores surgiu a necessidade da troca de informações entre os dispositivos que, naquele momento, ainda ocupavam salas inteiras e só eram controlados por especialistas. Com o compartilhamento dos computadores para que estes fossem utilizados por mais de um usuário ao mesmo tempo foram estabelecidas normas para a troca de informação, e daí surgiu o que hoje entendemos por protocolo de comunicação [15].

Para reduzir a complexidade dos projetos de uma rede, ela é organizada na forma de camadas que possuem a função de prover alguns serviços para as camadas adjacentes, sem que elas se preocupem de como esses serviços são realmente implementados. É nessa comunicação entre as camadas que os protocolos de comunicação são utilizados [16].

Analogamente, podemos imaginar o serviço postal como uma rede de comunicação (adaptado de [17]). O usuário que escreve uma carta, se preocupa basicamente com o conteúdo da carta e com o endereçamento da mesma, não precisando necessariamente saber como esta carta chegará ao seu destino. Em outras palavras, o conteúdo/idioma da carta é o protocolo de comunicação entre o escritor e o leitor da carta (camada 3), e o endereço é uma informação para a camada adjacente (camada 2).

O serviço de postagem (camada 2), sem se preocupar com o conteúdo da carta, tem a função de definir a melhor rota, quantos transbordos serão necessários, e posteriormente repassar a carta ao gerenciador de frota (camada 1). Nesta última camada, serão definidos quais os veículos utilizados em cada trecho e de fato iniciar o transporte da mensagem.

Nesta analogia, nota-se que existe uma abstração entre as camadas que permite inclusive que alguns funcionamentos sejam alterados sem comprometer a entrega da carta. Por exemplo,

não importa se o transporte da carta (camada 1) é realizado por um carro, moto ou caminhão. Assim como não importa as ruas que esses veículos irão utilizar definida pela camada 2.

Neste sentido, de utilização de camadas para organizar o funcionamento de uma comunicação, foi criado um modelo de referência pela Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization/ISO*) com o intuito de estabelecer diretrizes para os protocolos utilizados nas camadas e como elas são definidas.

O modelo de referência, denominado modelo OSI (*Open System Interconnection*), possui sete camadas que são numeradas de acordo com seu nível de abstração. Quanto menor o número da camada mais perto da chamada camada física, responsável pela transformação e transmissão de bits em sinais elétricos.

Segundo Fall e Stevens [18], ainda que diversas arquiteturas de protocolos tenham sido especificadas (como Xerox XNS e IBM SNA), a que se tornou mais popular foi a TCP/IP. Também conhecida como pilha TCP/IP, seu surgimento se deu mais pela idealização de um conjunto de protocolos como um modelo, do que o caso do modelo OSI, onde primeiramente foi idealizado o modelo em si e só depois foram desenvolvidos os protocolos.

Na Figura 3 é possível ver um comparativo entre os modelos e também alguns dos principais protocolos utilizados em cada camada do TCP/IP. Como mencionado, a pilha TCP/IP surgiu a partir de seus protocolos, e inclusive adotou em seu nome dos dois mais importantes: o TCP (*Transmission Control Protocol*) da camada de transporte e o IP (*Internet Protocol*) da camada Internet.

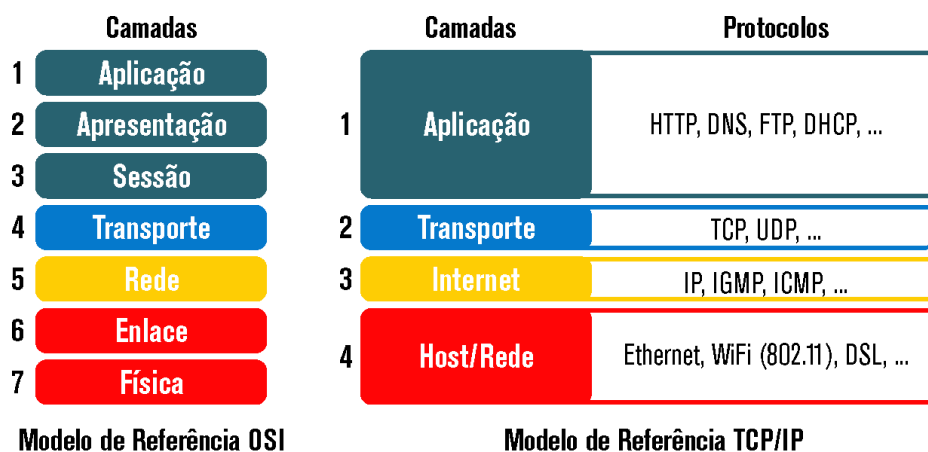


Figura 3 - Comparação entre o modelo de referência OSI e o modelo de referência TCP/IP

Neste capítulo serão relatadas algumas arquiteturas de rede, como a Light Weight IP (lwIP) (uma arquitetura baseada pilha TCP/IP), e algumas arquiteturas industriais, conhecidas

como Fieldbuses. Também serão tratados especificamente alguns protocolos como Ethernet, WiFi, Bluetooth e ZigBee.

A Figura 4 apresenta lado a lado as arquiteturas que serão apresentadas mais adiante com o intuito de facilitar o entendimento das semelhanças e diferenças de forma mais ampla e servir como referência ao longo do texto. Destaca-se o protocolo Ethernet que será o primeiro a ser tratado e encontra-se presente na maioria das arquiteturas como meio físico.

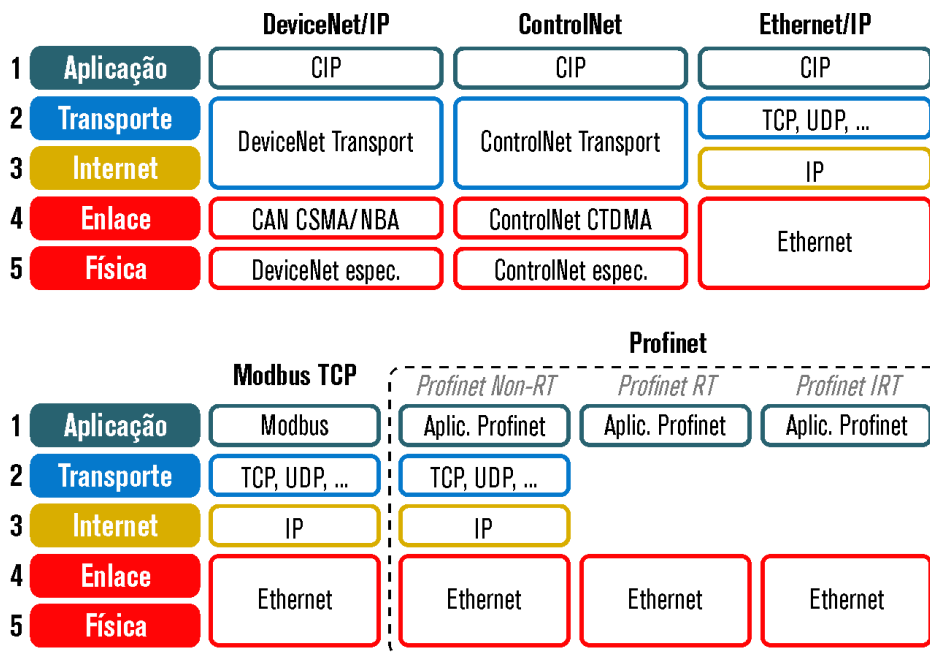


Figura 4 - Comparação entre arquiteturas de rede

2.2.1 Ethernet

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*/Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) é responsável pela implantação de padrões na área de engenharia elétrica e de computação, sendo o comitê 802 responsável pelas redes locais.

O protocolo Ethernet é um dos desenvolvimentos da IEEE e devido a sua enorme difusão, acabou se tornando um padrão mundial *de facto* desde sua criação na Xerox. Com as evoluções, o primeiro desenvolvimento ficou conhecido como Ethernet Clássica e as mais recentes como *Switched Ethernet*. Porém, nos dias atuais é comum se referir a *Switched Ethernet* apenas como Ethernet ou 802.3, que é o nome utilizado pela IEEE, e quando se refere à versão original, utiliza-se o termo *Classic Ethernet* [16].

A Ethernet em seu padrão permite a utilização de diversos tipos de meios físicos para a transmissão de dados. Na sua criação era usado um cabo coaxial com conectores BNC que permitiam transmissões de apenas 3 Mb/s e com alcance limitado de 1000 metros. Hoje o mais comum nas aplicações residenciais e de escritório é a utilização de cabos do tipo par trançado (Figura 5) com conectores RJ45 que permitem velocidades de 10 Mb/s ou 100 Mb/s na modalidade *Fast Ethernet* [15]. Uma característica interessante na utilização destes cabos, é que a norma especifica a necessidade de uso de transformadores acopladores, com a função de evitar problemas com referencial elétrico e ajudar na isolação de sinais. Em outras partes da rede também se encontram cabos de fibra ótica que alcançam velocidades acima de 10 Gb/s, e que vêm se aproximando cada vez mais dos usuários domésticos [16].



Figura 5 - Cabo com par trançado e conector RJ45.

Outra importante característica da Ethernet é a utilização do protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*/acesso múltiplo ao meio com detecção de colisão) que faz com que todos os dispositivos conectados à rede só enviem suas mensagens quando a mesma estiver disponível. Caso ocorra de os dois dispositivos fazerem este envio simultaneamente, haverá uma colisão e perda das informações. Devido a isto, o protocolo contempla um método de detecção de colisão e de como proceder na ocorrência deste fato. No caso, com a percepção da falha ao enviar a mensagem pelos dispositivos, estes esperarão um tempo aleatório e tentarão reenviar a mensagem. De acordo com a especificação do protocolo, caso ocorram novas falhas por colisões, os dispositivos repetirão o processo até que o número máximo de 16 tentativas seja atingido e será informado um erro a camada de gerenciamento superior ao protocolo CSMA/CD. Segundo a 802.3 é muito improvável que se percam mensagens por colisões seguidas, já que há um algoritmo que aumenta a faixa de tempo permitida para a geração dos tempos de espera aleatórios fazendo pequena as chances de estações da rede enviarem mensagens ao mesmo tempo [15].

Apesar da grande vantagem apresentada pelo protocolo CSMA/CD de verificação e confiabilidade na entrega de informações, surge o problema do determinismo, ou seja, não se sabe com certeza os tempos necessários para a transmissão de mensagens. Na maioria das aplicações de automação e controle, isto não é aceitável, já que a comunicação dos dispositivos da rede possui muita importância, como por exemplo um sinal de erro que deve ser interpretado imediatamente. Em contrapartida, existem soluções para isso com o avanço das tecnologias empregadas nos *switches* que fazem o gerenciamento da rede e podem, na prática, prover determinismo à rede ao evitar colisões que fariam aumentar o tempo de troca de mensagens.

Com a difusão da Ethernet, diversos dispositivos também passaram a adotar esse padrão e cada vez mais o interesse pelo seu desenvolvimento vem crescendo. Consequentemente, muitas aplicações com microcontroladores tornaram-se possíveis com o uso desta tecnologia e vêm sendo utilizadas industrialmente.

2.2.2 Light Weight IP

Como já apresentado, o TCP/IP é um conjunto de protocolos de transporte que em conjunto com a Ethernet está presente na maior parte das redes de comunicação hoje em dia. No intuito da utilização da pilha TCP/IP em microcontroladores, Adam Dunkels no Instituto de Ciência da Computação na Suíça, desenvolveu uma versão mais leve da TCP/IP com o objetivo de reduzir a utilização da memória RAM nos sistemas embarcados e mantendo os recursos da pilha. O novo protocolo foi denominado Light Weight IP (lwIP), conta com apenas 40 kilobytes e hoje é continuado por um grupo de desenvolvedores independentes de todo o mundo [19][20].

Os recursos em destaque incluídos na lwIP são:

- TCP (*Transmission Control Protocol*)
- UDP (*User Datagram Protocol*)
- DNS (*Domain Names Resolver*)
- DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*)

Ainda que existam outras implementações da pilha TCP/IP para sistemas embarcados, a lwIP é que mais se difundiu por principalmente ser de código aberto, ter boa performance e tamanho reduzido. A pilha possui três tipos de API's (*Application Programming Interface*/Interface de Programação de Aplicativos): RAW API, Netconn API e Socket API. A

primeira é a RAW base e funciona por métodos *callbacks*, ou seja, quando algum evento ocorrer um método será chamado para que haja um tratamento adequado. Por exemplo, quando algum pacote é recebido pela Ethernet, a pilha analisa a integridade do mesmo e responde com a confirmação de entrega da mensagem.

As outras duas API's, Netconn e Socket, funcionam sobre sistemas multi-threads, ou seja, sistemas que podem executar tarefas paralelas, porém, são de mais alto nível e demandam maior processamento, trazendo menor otimização no funcionamento da pilha.

Essas características são extremamente importantes ao se definir em quais aplicações e sobre quais condições esse protocolo deve ser selecionado.

2.2.3 Fieldbuses

Desde o surgimento dos computadores, a indústria viu a vantagem de sua utilização em diversas aplicações. No início, setores como contabilidade, setor de compra e venda, estoque, qualidade e etc. foram os primeiros beneficiados. Com os microcontroladores, os sistemas até então valvulados ou acionados por relé foram substituídos e hoje até mesmo sensores e equipamentos da mais baixa hierarquia fabril estão recebendo tecnologia que permite automação e comunicação entre dispositivos [15].

Essa troca de informação no ambiente industrial se difere bastante da que acontece nos ambientes de escritório ou residenciais, principalmente pelo ambiente hostil e pelos requisitos de confiabilidade, segurança e velocidade necessários. Fieldbus é o nome da família de protocolos que foram desenvolvidos e já padronizados para o uso na indústria, no entanto, apesar de estes protocolos atenderem diversas necessidades das aplicações industriais normalmente suas implementações são complicadas, caras e muitas vezes incompatível com outros sistemas. Neste trabalho, os protocolos dessa família são abordados no intuito de embasar e contextualizar as tecnologias existentes.

2.2.3.1 DeviceNet

A arquitetura DeviceNet opera sobre uma rede CAN (Controller Area Network) que especifica os requisitos das camadas mais baixas de comunicação, como o meio físico e o link de dados, e utilizada na camada de aplicação o protocolo CIP (Common Industrial Protocol). As características mais importantes do DeviceNet se dão pelo determinismo da rede, ou seja,

se sabe com precisão o tempo necessário para a transferência de informações entre integrantes da rede, utilização de cabo STP ou fibra óptica no meio físico, permite até 64 nós na rede e possibilita taxas de comunicação de até 500 kb/s [23].

2.2.3.2 ControlNet

A ControlNet, assim como a DeviceNet, também utiliza do protocolo de aplicação CIP, e se diferencia principalmente deste último pela possibilidade de utilização de cabos de redundância na rede, além da maior taxa de comunicação de 5 Mb/s. Outros destaques são o maior número de nós na rede, até 99 e a utilização de cabo coaxial ou fibra óptica no meio físico [24].

2.2.3.3 Ethernet/IP

O protocolo Ethernet/IP (*Ethernet Industrial Protocol*), assim como o DeviceNet e ControlNet, é gerenciado pela ODVA e também utiliza o protocolo CIP na camada de aplicação. Este protocolo é o que mais se aproxima da rede Ethernet (em conjunto a pilha TCP/IP) e foi criado com o intuito de trazer os benefícios das redes e infraestruturas atuais para aplicações da industrial. Contudo, algumas limitações da própria Ethernet também acompanham esta tecnologia, principalmente o não-determinismo. Este último é o principal problema para o uso industrial e, sendo assim, o maior alvo para desenvolvimento no protocolo. Devido a esses desenvolvimentos, hoje já existem alguns componentes de gerenciamento inteligentes que, na prática, podem até trazer a característica de determinismo para a rede [25].

2.2.3.4 Modbus TCP

Assim como o protocolo Ethernet/IP, o Modbus TCP também utiliza a pilha TCP/IP e o protocolo Ethernet para comunicação entre os dispositivos, e sobre a camada de aplicação é implementado o protocolo Modbus. Este último é tido como um protocolo simples e de fácil implementação se comparado a Ethernet/IP, porém, algumas características como segurança e velocidade não alcançam o mesmo desempenho.

2.2.3.5 PROFINET

O protocolo Profinet utiliza o protocolo Ethernet como meio físico, porém, não utiliza somente a pilha TCP/IP para conexão entre os dispositivos da rede. De fato, o PROFINET utiliza simultaneamente três protocolos de comunicação na rede (Figura 4). O uso de um ou outro se dará pelo tipo e configuração do dispositivo.

De acordo com Lugli [26], os protocolos dentro do PROFINET são descritos como:

- Profinet Non-RT: Este modo faz uso da pilha TCP/IP e não é considerado como uma comunicação de tempo real pois seu tempo de processamento pode chegar até 100 ms. Os dispositivos configurados dessa forma, são geralmente IHM's ou gateways na rede.
- Profinet RT: No modo *Real Time* (RT), a pilha TCP/IP não é utilizada, e por isso, mensagens entre dispositivos configurados nesse modo não chegam a passar de 10 ms, devido ao encurtamento e simplificação dos cabeçalhos das mensagens.
- Profinet IRT: Em aplicações bastante específicas, é possível de se utilizar o protocolo Isochronous Real Time (IRT) que realiza a troca de mensagens de maneira cíclica e com tempos que podem não vir a passar de 1 ms.

2.2.4 WiFi

O protocolo de comunicação WiFi é baseado nas normas da IEEE 802.11 e a marca é mantida pela WiFi Alliance que certifica os produtos que passam em seus testes de interoperabilidade. Atualmente existem diversas versões do protocolo que incluem melhorias de velocidade, alcance, segurança, entre outros, sempre mantendo a compatibilidade com as outras versões. As versões são denominadas com uma letra após o nome do protocolo IEEE 802.11 x, onde x pode ser a, b, g, n, ac, ou mais recentemente ad, que é a última versão do WiFi com características gerais de 60 GHz de frequência de transmissão e podem alcançar teóricos 7 Gb/s (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Versões do protocolo WiFi. Adaptado de [27]

802.11	legacy	a	b	g	n	ac	ad
Velocidade Máxima	1.2 Mbit/s	54 Mbit/s	11 Mbit/s	54 Mbit/s	150 Mbit/s	800 Mbit/s	7 Gbit/s
MIMO	não	não	não	não	até 4	até 8	-
Frequência	2.4 GHz	5.8 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 & 5 GHz	5 GHz	60 GHz
Ano	1997	1999	1999	2003	2009	2013	2017

O protocolo WiFi, por ser o mais utilizado, é o que apresenta também a maior quantidade de informações disponíveis, além do baixo custo do hardware necessário para a implementação do mesmo, tanto em PCs como em sistemas embarcados.

As limitações da tecnologia estão normalmente atreladas a arquitetura de rede do tipo estrela utilizada, ou seja, todos os dispositivos conectados a um roteador central. Esta configuração, assim como no Bluetooth que será visto a seguir, limita o alcance da rede em alguns metros.

Na soldagem, somente nos últimos anos se começou a estudar a aplicação do WiFi em equipamentos [28][29]. Os problemas sempre foram relacionados com a confiabilidade na comunicação entre os dispositivos. Devido ao avanço da tecnologia WiFi, do surgimento de novas aplicação na soldagem, e também da enorme difusão de dispositivos como smartphones, *tablets*, computadores portáteis, etc. esta tecnologia tem se tornado uma solução para os fabricantes que criam aplicações com uso desses aparelhos. Por exemplo, há fontes de soldagem que podem ser configuradas totalmente pelo smartphone, ou ainda, que ao se selecionar um programa na fonte de soldagem, as especificações de procedimento de soldagem (EPS) são disponibilizadas para o usuário via comunicação sem fio pela fonte. Esta característica inclusive, vem impulsionada pela Indústria 4.0 que busca pela virtualização dos processos em execução, além da aquisição de dados em tempo real de status e funcionamento dos equipamentos.

O WiFi também tem espaço na soldagem para aplicações de sensoriamento e sistemas de visão [28]. Devido à alta taxa de comunicação requisitada pelas câmeras de filmagem, o WiFi talvez seja o protocolo de comunicação que mais se adequa para estas aplicações. Ainda que se deva tomar algumas precauções devido aos ruídos gerados durante o processo de soldagem.

2.2.5 Bluetooth

O Bluetooth é uma tecnologia de comunicação sem fio e de curto alcance que tem se desenvolvido ao longo dos últimos anos e hoje, junto ao WiFi, é uma das tecnologias com maior presença em dispositivos com comunicação sem fio. O SIG (*Special Interest Group*) é uma organização sem fins lucrativos que reúne mais de 30 mil empresas de todo o mundo a fim de manter e melhorar o protocolo [30].

A versão 5 é a mais atual e foi lançada em 2017, prometendo o dobro da velocidade e 4 vezes o alcance da versão anterior (4.2). Na prática se estima que o alcance seja de 200 metros em ambientes abertos e 40 metros em ambientes fechados. A tecnologia permite a conexão simultânea de até 8 dispositivos, taxas de comunicação estimadas de 2 Mb/s e com baixo consumo de energia [31].

Apesar do crescente número de dispositivos que adotam o Bluetooth, a maior parte deles são de uso pessoal, como headphones, vestíveis (*smartwatch*, tênis, contadores de passo), caixas de som, videogames, brinquedos, etc. Em ambientes industriais, a presença do Bluetooth ainda é muito tímida, primeiramente devido as primeiras versões da tecnologia, que relativamente consumiam muito bateria, tinham baixo alcance e taxa de comunicação limitada perante aos requisitos industriais.

Na soldagem, o advento da Indústria 4.0 tem impulsionado novamente a utilização do Bluetooth e alguns fabricantes estão começando a trazer aplicações com comunicação sem fio. Os usos com a tecnologia apresentados foram tais como pedais de disparo de solda e interfaces homem-máquina (IHM) sem fio [12].

2.2.6 ZigBee

O protocolo ZigBee baseia-se na camada física de acesso ao meio da norma 802.15.4 onde são especificadas as características de rede sem fio para redes locais. A principal característica do ZigBee é o baixo consumo de energia, baixo custo e a topologia de rede de comunicação ponto-a-ponto ou malha. Nesta última, os dispositivos funcionam como nós de uma rede que tanto recebem e enviam mensagens como também repassam informações que não puderam ser entregues pelos interlocutores devido a distância entre eles. Apesar de individualmente o alcance da transmissão ser em torno de 50 metros, esse valor pode alcançar quilômetros devido a arquitetura do tipo malha [32].

As taxas de transmissão ainda que baixas, tipicamente de 20 a 250 kb/s, em comparação com outros protocolos como Bluetooth ou WiFi 802.11g, são suficientes para aplicações de sensoriamento e transmissão de dados que necessitem de pouca banda. Como estas aplicações também não precisam estar ativas a todo momento, os dispositivos podem entrar no modo *sleep* e fazer o consumo de energia ser mínimo. Isto só é possível pois o tempo de transição para o modo ativo é, normalmente, de apenas 15 ms, não trazendo transtornos para a troca de mensagens [32].

O protocolo é mantido e desenvolvido pela ZigBee Alliance [33] que agrupa diversos fabricantes e usuários e expande cada vez mais sua atuação. Hoje o foco está na IoT (*Internet of Things/Internet das Coisas*) que cada vez mais se insere no campo industrial e de automação [34]. Estudos também vem sendo realizados em diversas aplicações de dispositivos vestíveis na área de saúde [35][36][37] e surgem como modelo de solução para outras aplicações industriais.

2.3 FONTES DE SOLDAGEM

Nas últimas décadas as fontes de soldagem tiveram grandes evoluções quanto suas arquiteturas construtivas, passando de fontes rotativas para fontes estáticas, e estas últimas de analógicas para as fontes chaveadas modernas e microprocessadas.

As fontes modernas em sua maioria manipulam a energia da rede elétrica por meio de transistores em frequências elevadas, usualmente acima de 20 kHz [38], a fim de alcançar as dinâmicas requeridas em processos avançados de soldagem e melhorias construtivas dos equipamentos como tamanho e peso [39]. Esta dinâmica, apesar de essencial para manutenção dos processos, tem como consequência a geração de interferências eletromagnéticas (EMI) (Ver Figura 6) que podem ser minimizadas de três formas: eliminar a geração na própria fonte do ruído, criar barreiras contra a propagação do ruído ou tornar o eventual receptor de sinais menos susceptível a estes ruídos [28]. Em soldagem, normalmente se adota a segunda opção, desde a utilização de cabos blindados em circuitos de comunicação até o encapsulamento de placas e módulos do sistema em gabinetes blindados.

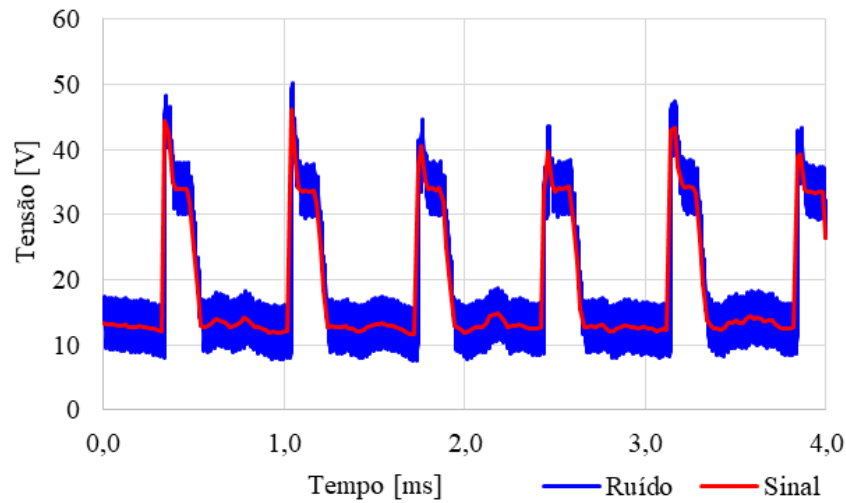


Figura 6 - Ruído de chaveamento sobre o sinal gerado

Com o avanço das tecnologias embarcadas nas fontes, principalmente com a utilização dos microcontroladores, estes equipamentos além da melhoria em sua atividade principal de soldagem, também se tornaram aptos a atenderem uma demanda da indústria que busca pela qualidade e rastreamento da produção. Essa evolução é causada principalmente pela implementação de sistemas inteligentes com a utilização da comunicação entre dispositivos.

Nas fontes de soldagem, devido ao ambiente industrial no qual estão inseridas, os protocolos de comunicação são normalmente criados e especificados pelos fabricantes de modo que se contorne os problemas inerentes a comunicação em ambiente hostil. Essa abordagem, contudo, limita o uso da comunicação das fontes à dispositivos que sejam compatíveis com essas especificações próprias. Como os protocolos e tecnologias seguem em constante evolução, apesar dos fabricantes incentivarem seus parceiros a oferecerem produtos compatíveis, estes últimos se veem numa situação onde a variedade de sistemas aumenta e não se torna vantajoso o desenvolvimento de periféricos que rapidamente se tornariam obsoletos.

Como um exemplo, no LABSOLDA, sendo um ambiente de pesquisa, se tem uma grande variedade de fontes de soldagem avançadas de tipos e modelos diferentes, entretanto, nenhuma delas apresenta alguma solução para comunicação com outros periféricos que não os de desenvolvimentos próprio, o que caracteriza seu produto como uma solução fechada e dificulta o estabelecimento de sistemas mais inteligentes.

2.4 MANIPULADORES

A soldagem é uma das aplicações que mais emprega robôs na indústria com 29% de representatividade [40][41] e tal fato se deve principalmente pelas vantagens que os equipamentos proporcionam quanto à qualidade na execução das tarefas, pela maior produtividade e também pela diminuição do emprego de recurso humano num ambiente normalmente insalubre, perigoso e com atividades repetitivas [42].

Com o advento da Indústria 4.0 os manipuladores robóticos possuem um papel importante na cadeia produtiva devido a sua presença na maior parte das plantas e das tecnologias de automação já presentes nesses sistemas. Existem diversas arquiteturas quanto aos tipos dos robôs manipuladores, como o cartesiano, antropomórfico, SCARA, polar, esférico, etc., porém, eles normalmente possuem em comum os sistemas de comando, que no geral são feitos por controle via computador e/ou microcontrolador. Isso possibilita que atualizações e novas tecnologias sejam embarcadas em sistemas já existente ampliando o campo de atuação destes equipamentos.

Em soldagem, por exemplo, sistemas avançados já integram fontes de soldagem, manipuladores e outros sensores. Pode ser citado, soluções como as da Yaskawa Motoman, que é uma das maiores fabricantes de robôs do mundo [43] e possuem produtos como o ComArc [44], que em conjunto a fonte de soldagem detecta o posicionamento da junta a ser soldada fazendo uma varredura num espaço programado até que haja o contato entre o arame de solda com a peça. Outro produto também da Motoman é o MotoEye [45] que integra sensores LASER permitindo além da detecção da junta o rastreamento a soldagem, o que possibilita eventuais correções de discontinuidades durante o processo.

Quanto aos meios de comunicação com robôs manipuladores, estes têm se mostrado bastante avançados. Desde seu início, já permitiam o controle de variáveis por meio de portas lógicas, por exemplo, e hoje já é possível a utilização de diversos protocolos de comunicação no mesmo robô. Grande parte disso, é devido ao uso dos controladores lógicos programáveis (CLP) que se tornaram mais poderosos e estão presentes na maioria desses equipamentos.

Na soldagem, uma atividade comum entre robôs e fontes de soldagem é a sincronização entre o movimento da tocha efetuado pelo robô e os parâmetros elétricos que são impostos pela fonte de soldagem. Processos com soldagem orbital, soldagem com tecimento transversal ou longitudinal (*switchback*) ou ainda outros processos que variam a posição de soldagem são os que normalmente fazem uso desse recurso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS

Com o objetivo proposto e a fundamentação acerca do tema, foram levantadas as tecnologias que seriam alvo do trabalho. Se considerou sistemas existentes na soldagem como um todo e também os que já faziam parte das pesquisas no LABSOLDA. Citam-se:

- Sistemas com controladores lógicos programáveis (CLP);
- Sistemas microcontrolados;
- Sistemas de tempo real;
- Comunicação cabeada ponto-a-ponto:
 - RS232;
 - RS485;
 - UART;
- Comunicação cabeada em rede:
 - Ethernet (IEEE 802.3);
 - Ethernet/IP;
 - CAN;
 - Profinet;
 - Modbus TCP
 - I2C;
 - I2S;
- Comunicação sem fio:
 - ZigBee;
 - Bluetooth;
 - Wifi (IEEE 802.11);
 - WirelessHART;

No LABSOLDA pesquisas têm sido realizadas com tecnologias como:

- Computadores embarcados (PC104);
- Microcontroladores ARM;

- Comunicação RS232;
- Comunicação RS485;
- Comunicação WiFi (IEEE 802.11);
- Comunicação Ethernet (IEEE 802.3);

Como visto, as inovações da Indústria 4.0 trouxeram novas demandas e aplicações que até então não eram o foco de pesquisas em soldagem, inclusive pela distância que existia nas áreas de conhecimento como mecânica, eletrônica e tecnologia da informação. Hoje essa distância tende a desaparecer com a maior integração e inteligência embarcada nestes sistemas. Afim de aliar este conceito aos equipamentos presentes no LABSOLDA, foram selecionados como alvo neste trabalho a fonte de soldagem Digiplus A7 da IMC e o manipulador cartesiano de 4 eixos Tartilope V4 da SPS.

Estes equipamentos evoluíram nos últimos anos e já empregam sistemas de controle embarcado, sensores, atuadores e circuitos digitais, sistemas de comunicação, etc. Com essa definição dos equipamentos alvo no trabalho, foram avaliadas as tecnologias de comunicação viáveis para os mesmos, considerando ainda atualizações ou pequenas alterações necessárias para que exista alguma compatibilidade.

No escopo da Indústria 4.0 foi tomado como referência a integração de dispositivos inteligentes em rede por meio de protocolos de comunicação já existentes e que tendem a se consolidar na indústria, além das funções inerentes da Indústria 4.0, como armazenamento de dados, segurança da informação, modularidade, etc.

Tendo estas características em vista, e vislumbrando acompanhar as tendências de utilização de protocolos difundidos nos equipamentos de soldagem, foram definidos para o trabalho as tecnologias de comunicação Ethernet (IEEE 802.3) e ZigBee (IEEE 802.15.4).

Os outros protocolos de comunicação citados no trabalho, como WiFi, Bluetooth e os integrantes da Fieldbus também foram ponderados como alvo de estudo, porém, algumas características dos mesmos foram essenciais para que não se investigasse suas funcionalidades na prática. Sendo citadas, a limitação de conectividade de não mais do que 8 dispositivos no protocolo Bluetooth, além de seu alcance limitado. O custo de hardware e as plataformas fechadas dos fieldbuses também influenciaram para que a investigação de sua aplicação não fosse prioridade. O WiFi, assim como o Bluetooth, parece promissor no meio da soldagem, porém, neste trabalho o WiFi e suas diversas variantes (IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ad) também

não farão parte do escopo devido a resultados preliminares de outros projetos em andamento que abordam esse tema.

Essas tecnologias que estão na fronteira do conhecimento do LABSOLDA, impulsionando a pesquisa para novas searas, são as que melhor se compatibilizam com os equipamentos disponíveis, e permitem evoluções para novos protocolos em aplicações mais específicas se necessário e possuem informações difundidas na literatura e mão de obra técnica em empresas que fariam uso desses avanços.

3.1.1 Análise de requisitos

Tendo em vista as tecnologias definidas para o trabalho, considera-se ainda um levantamento dos requisitos de comunicação no ambiente de soldagem e seu relacionamento com os fenômenos físicos e os tempos de computação e resposta do sistema.

Em soldagem, é comum fenômenos acontecerem em frequências acima de 100 Hz, exigindo sistemas de controle na fonte de soldagem que atuem em frequências elevadas [46] (na ordem de 20 kHz), porém, não é objetivo desse trabalho desenvolver sistemas com sinais de controle pela rede de comunicação, tendo em vista que a confiabilidade e tempos de resposta devem ser altíssimos no controle da soldagem.

Sistemas de aquisição de dados de soldagem para análise e pesquisa possuem frequências de aquisição bastante elevados (na ordem de 5 kHz) afim de identificar pequenas oscilações e fenômenos bastante rápidos na soldagem, porém, em sistemas de rastreabilidade e qualidade não é necessária tal taxa de aquisição. Normalmente, os valores médios são suficientes para uma correta interpretação do que está acontecendo durante a soldagem [47], e a grandeza para aquisição desses sinais é na ordem de 300 Hz [29]. Também para este último fim, a perda de dados não significa a invalidação total de uma aquisição, o mesmo para uma eventual desconexão que de nada afetaria o controlador do sistema. Sendo assim, entende-se que ações de intertravamento e comandos de controle não fazem parte do escopo dos periféricos na rede.

Uma característica importante dos sistemas de soldagem é a presença de ruídos oriundos de perturbações eletromagnéticas tanto pelo chaveamento das fontes modernas quanto dos ruídos gerados pelo próprio processo de soldagem. Historicamente, tecnologias foram desenhadas especificamente para tais processos, com a utilização de protocolos próprios e eletrônica específica. Como já comentado, com o advento da Indústria 4.0, diversas empresas

passaram a utilizar protocolos já existentes e não projetados para tal fim, considerando eventuais falhas como aceitáveis e contornando-as com a escolha correta das aplicações [12][13][14]. Deve-se, portanto, avaliar a utilização das tecnologias aqui escolhidas: Ethernet e ZigBee.

3.2 MATERIAIS

De modo geral, os principais materiais para a realização do trabalho podem ser categorizados como equipamentos e softwares de desenvolvimento e análise. Na sequência os mesmos serão apresentados e por último a metodologia utilizada.

3.2.1 Fonte de soldagem IMC DIGIPLUS A7

No trabalho será utilizada uma fonte multiprocessos do fabricante IMC modelo Digiplus A7 (Figura 7) que é microcontrolada em arquitetura ARM e compatível com a MCU selecionada para a integração dos sistemas.



Figura 7 - Fonte multiprocessos IMC Digiplus A7. Fonte: Manual de Instruções [50].

Como o LABSOLDA conta com mais de uma unidade dessa fonte de soldagem, isso possibilitou ensaios das redes de comunicação com mais de uma célula de soldagem em funcionamento simultâneo.

3.2.2 Robô manipulador SPS Tartílope V4

Assim como a fonte de soldagem e o SAP, o robô manipulador é fabricado por uma empresa parceira do LABSOLDA, a SPS – Soluções para Soldagem, a qual permitiu o acesso e desenvolvimento no seu produto Tartílope V4 (Figura 8).

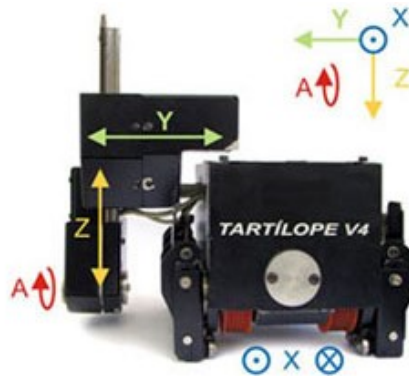


Figura 8 - Manipulador Tartílope V4. Fonte: SPS – Sistemas e Processos de Soldagem [51].

O robô cartesiano com 4 eixos também é controlado por uma unidade de microprocessamento baseada na arquitetura ARM e assim facilitou seu desenvolvimento com as outras ferramentas já citadas.

3.2.3 Sistema de Aquisição Portátil

Também fabricado pela IMC, o SAP (sistema de aquisição portátil) (Figura 9) permitiu a aquisição de dados dos ensaios de soldagem numa taxa de 5000 Hz. O equipamento conta com canais de medição para tensão, corrente, velocidade de arame e vazão do gás. Os grandes atrativos do SAP para este trabalho foram as medições de corrente e tensão, já que a fonte só faz a transmissão das informações destas grandezas.

Como o intuito não foi de transmitir os dados dos processos em tempo real, o recurso do SAP de disponibilização de valores médios foi o principal elemento de comparação com as informações transmitidas pela rede.

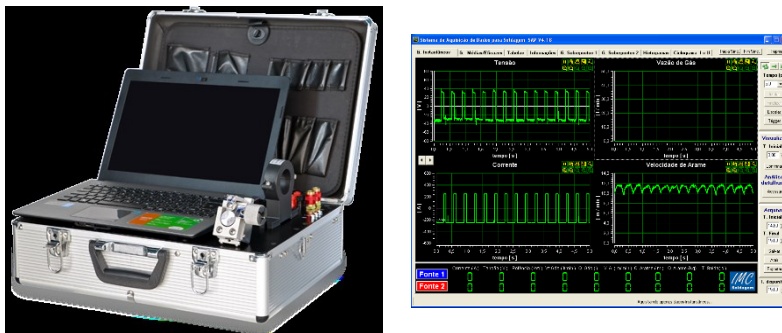


Figura 9 - Sistema de aquisição portátil

3.2.4 Unidade de microprocessamento

Para que houvesse compatibilidade com os equipamentos disponíveis no LABSOLDA e também por indicação dos fabricantes dos principais componentes da célula de soldagem utilizada neste trabalho (descrita ao longo deste capítulo), o microprocessador selecionado para tornar possível a inserção do equipamento numa rede foi o STM32F4-Discovery (Figura 10).



Figura 10 - STM32F4-Discovery

Esta MCU (*microcontroller unit*/unidade de microcontrolo) é uma solução concebida pelo fabricante STM que utiliza como CPU (*central processing unit*/unidade central de processamento) o chip STM32F407VGT6 com arquitetura ARM Cortex® M4 32-bit com 1MB de memória flash e que pode operar em velocidades de 168 MHz.

Entre outros recursos como, acelerômetros, depuradores de áudio e depuradores embarcados, os que mais se destacam nesta MCU são os de comunicação. Ela suporta protocolos como CAN, USB OTG, USART, I2C, I2S, SPI e o principal para este trabalho que é a Ethernet. Esta última ainda apresenta algumas características que podem ser destacadas

como a velocidade de 10/100 Mb/s e conta com a função DMA (*direct memory access*/acesso direto à memória).

3.2.5 Dispositivos de rede

Como foram implementados dois tipos de rede, com e sem fio, foram selecionados componentes específicos para cada uma das finalidades.

3.2.5.1 Rede cabeada

O dispositivo PHY (nome com origem no modelo OSI, referente a camada física) que propiciou a conexão cabeada da MCU é o modelo DP83848 PHY fabricado pela Wave Share (Figura 11).

Este módulo permite conexão Ethernet com velocidades de 10/100 Mb/s, o que é perfeitamente compatível com a MCU citada anteriormente e apresenta em sua construção o conector RJ-45 com transformador integrado, servindo como um isolador do sistema.

O módulo, assim como os dispositivos mais atuais, também conta com a tecnologia Auto-MDIX (*automatic media dependent interface crossover*) [48] que detecta o tipo do cabo que está sendo utilizado e configura automaticamente o funcionamento do dispositivo. Na prática, isso significa que se pode utilizar o mesmo cabo para conectar o módulo à um roteador/switch ou mesmo diretamente num PC, dispensando o uso dos cabos *crossover* [49].



Figura 11 - DP83848 Ethernet Board

3.2.5.2 Rede sem fio

Para o estudo da comunicação sem fio foi utilizado a tecnologia baseada no protocolo ZigBee. O maior fabricante de sistemas embarcados com essa tecnologia é a DIGI, que produz os módulos XBee® ZigBee (Figura 12). Para a avaliação do comportamento dos módulos sem

fio, foram utilizadas duas versões dos módulos de comunicação: modelo padrão e modelo PRO. A diferença entre eles se dá principalmente pela potência nos sinais de cada modelo e, tratando-se de uma célula de soldagem, que é considerada um ambiente hostil para sinais via rádio, foram realizados ensaios com os dois modelos. No Quadro 1 são apresentadas as principais características de cada um dos modelos.

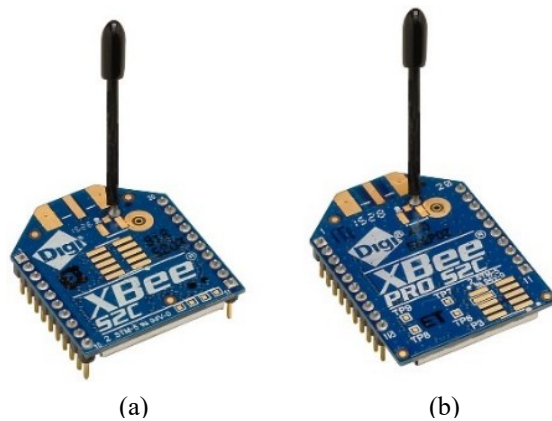


Figura 12 - a) Módulo XBee ZigBee TH (wire antenna). b) Módulo XBee ZigBee PRO TH (wire antenna)

Quadro 1 - Comparação entre módulos de comunicação XBee ZigBee

Especificações	XBee ZigBee	XBee ZigBee-PRO
Performance		
Alcance em ambiente fechado	Até 60m	Até 90m
Alcance em ambiente aberto	Até 1200m	Até 3200m
Potência de transmissão (máxima)	6,3mW (+8dBm), modo Boost 3,1mW (+8dBm), modo Normal Canal 26 a potência máxima é +3dBm	63mW (+18dBm)
Taxa de transmissão RF	250,000 b/s	
Requisitos de alimentação		
Alimentação ajustável	Sim	
Tensão de alimentação	2,1 - 3,6 V	2,7 - 3,6 V
Corrente de transmissão (transmissão)	45mA (+8 dBm, Boost mode) 33mA (+5 dBm, Normal mode)	120mA @ +3,3V, +18 dBm
Corrente de transmissão (recepção)	31mA (modo Boost) 28mA (modo Normal)	31mA
Gerais		
Faixa da frequência de operação	ISM 2,4 - 2,5 GHz	
Rede e Segurança		

Topologias de rede suportada	Ponto-a-ponto, Ponto-a-multipontos, Peer-to-peer e Malha
Opções de endereçamento	PAN ID and Addresses, Cluster Ids and Endpoints (opcional)
Opções de interface	
UART	1 Mb/s (burst)
SPI	5 Mb/s (burst)

Fonte: XBee/XBee-PRO ZigBee RF Module Guia do Usuário. Adaptado pelo autor.

3.2.6 Ferramentas de desenvolvimento e análise

Para o desenvolvimento dos softwares e *firmwares* do trabalho foram utilizadas ferramentas compatíveis e indicadas para cada plataforma. Estas ferramentas são conhecidas como IDE (*integrated development environment*/ambiente de desenvolvimento integrado) e auxiliam a programação das aplicações necessárias.

Também fez uso de softwares para análise de rede e gerenciamento de banco de dados.

3.2.6.1 Keil μ Vision

O Keil μ Vision é uma das IDE's suportadas pela MCU STM32F4-Discovery e conta os recursos de compilação e depuração para o modelo específico. O próprio fabricante da MCU disponibiliza modelos e exemplos para esta ferramenta e facilita o uso com manuais e softwares de terceiros para desenvolvimento. Além do fato de o LABSOLDA contar com a licença da IDE, a mesma é superior quando comparada à outras ferramentas gratuitas disponíveis, no sentido de melhor gerenciamento de arquivos, editor de código, configuração do compilador e etc. Por isso, seu uso foi aderido.

3.2.6.2 Microsoft Visual Studio

Como um dos objetivos do trabalho é a confecção de uma aplicação para interfaceamento e gerenciamento de informações das células de soldagem, o Microsoft Visual Studio foi usado devido ao suporte a várias linguagens de programação, pela compatibilidade com ambiente Windows, pela interface amigável em criação de telas e leiautes e também pela disponibilidade gratuita da ferramenta.

3.2.6.3 Wireshark

O Wireshark é um conhecido *sniffer* de rede que permite a avaliação do tráfego, falhas e problemas numa rede Ethernet. Possibilita também identificar os dispositivos e mensagens trocadas entre eles, assim como o tempo que cada uma demandou para ser efetuada.

3.2.6.4 DB Browser for SQLite

Para gerenciamento do banco de dados neste trabalho (apresentado no capítulo 4.3.2 Banco de dados) foi utilizado o software de código aberto e gratuito DB Browser for SQLite que além de permitir a criação e edição de tabelas, também é possível a realização de queries (linhas de comando) em SQL com execução e demonstração dos resultados no próprio programa, tornando possível, por exemplo, a criação de gráficos, tabelas, análise de resultados e fácil acesso a informações armazenadas no banco de dados.

3.3 MÉTODOS

Na primeira etapa do trabalho foram realizadas caracterizações e análises do funcionamento dos recursos do microcontrolador, análise da LwIP e ensaios com ZigBee. Para isso, foram desenvolvidos *firmwares* que permitissem a avaliação dos *timers*, interrupções, comunicação serial, conversor analógico-digital e conversor digital-analógico, acesso direto à memória (DMA), assim como a geração de bibliotecas que facilitassem o uso posterior destes recursos.

Também se implementou o recurso de comunicação Ethernet para que os softwares localizados em outros dispositivos da rede conseguissem acessar e estabelecer uma comunicação com microcontrolador. Os ensaios para essa etapa inicial foram realizados ainda em ambiente controlado seguindo os padrões de redes corporativas e/ou domésticas, já que se deseja somente a validação e desenvolvimento de software e *firmware*.

Seguindo essa linha de desenvolvimento, foram implementadas as mesmas metodologias para o desenvolvimento de uma rede de comunicação sem fio e sua avaliação foi feita predominantemente pelo Wireshark. Especificamente, foram realizados ensaios nos dois modos com módulos do fabricante Digi, modelos XBee ZigBee, com o intuito de caracterizar os tempos de respostas e integridade das informações em cada uma das redes.

Para o desenvolvimento dos programas utilizados ao longo do trabalho, foram utilizadas as linguagens de programação de maior domínio pelo autor como C, C++ e C# e que são compatíveis com as necessidades propostas.

Como visto anteriormente, os fabricantes dos principais componentes da célula de soldagem considerada neste trabalho, como a IMC das fontes de soldagem e a SPS do robô manipulador, se dispuseram a fornecer informações proprietárias para que se fosse possível o desenvolvimento da integração dos sistemas, como os manuais, *firmware* e esquemáticos elétricos dos equipamentos.

Com a realização dos desenvolvimentos e testes em ambiente controlado, intencionou-se submeter todo o sistema a ensaios numa célula de soldagem montada no LABSOLDA, e ainda que seja um ambiente de laboratório, simular as características de um ambiente industrial. O LABSOLDA conta com um vasto número de equipamentos em sua planta e permite a utilização de forma que se fossem produzidos ruídos e estímulos no campo magnético da célula de soldagem em teste. Ressalta-se aqui que a utilização de processos de soldagem com a abertura de arco em “alta frequência” (um método que produz uma elevada tensão num curto período de tempo) gera ruídos no ambiente e afetam os meios de comunicação próximos.

Com a implementação da célula de soldagem integrada, foi iniciado o desenvolvimento da aplicação em ambiente Windows por meio do Microsoft Visual Studio para o gerenciamento de uma ou mais células de soldagem e para que a mesma forneça as informações adquiridas dos processos.

Ainda que a definição da metodologia orientou o andamento do trabalho, algumas avaliações e análises que surgiram ao longo do trabalho demandaram novas atividades e as mesmas são descritas conforme são apresentadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os fabricantes de sistemas de soldagem ainda estão estabelecendo tecnologias de informação que se adequem em seus equipamentos ou dispositivos. Os resultados aqui apresentados contemplam primeiramente uma avaliação e caracterização dos componentes utilizados no trabalho e também uma abordagem de comunicação utilizando o protocolo Ethernet e LwIP em um microcontrolador embarcado. Especificamente, aqui foram utilizadas as fontes de soldagem como dispositivo principal de testes.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES SELECIONADOS PARA O TRABALHO

4.1.1 STM32F4-Discovery

Para a validação das compatibilidades entres os recursos selecionados, alguns sistemas foram testados e vale aqui ressaltar dois pontos que foram importantes para a viabilidade do projeto.

O primeiro ponto para ser validado foi o de implantação de uma rede Ethernet com a MCU STM32F4-Discovery utilizando-se dos materiais de exemplo fornecidos pelo fabricante. Para o ensaio, a MCU foi programada com um *firmware* que ecoava as mensagens enviadas para o endereço IP nele configurado. Por meio do *sniffer* de rede Wireshark, pôde-se verificar a integridade das mensagens e que os tempos das trocas de informação foram de 0,8 ms em média para cada pacote, o que preliminarmente foi considerado um bom resultado. Na Figura 13 podemos conferir a topologia empregada para o teste, que utilizou um switch D-Link DGS-3100-24.

Com a validação da comunicação utilizando a MCU, se iniciou um estudo para utilização da STM32F4-Discovery como a unidade de microprocessamento do Tartílope V4. Como o robô manipulador e a fonte de soldagem utilizam atualmente a mesma MCU, bastaria somente um estudo no Tartílope V4 para validar o uso.

Foram identificadas as portas de entrada e saída do equipamento e modificado o *firmware* original para que houvesse compatibilidade com o novo microcontrolador. Além disso, também foi criada uma placa para se fazer o interfaceamento com a placa-base do robô

com a nova MCU, funcionando como um adaptador (Figura 14). Com esses recursos o equipamento tornou-se apto a fazer parte de uma rede de comunicação Ethernet.

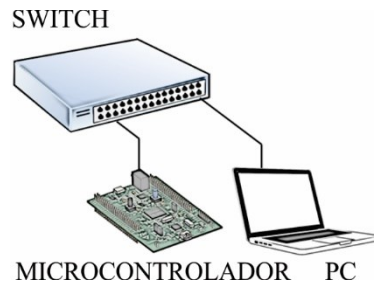


Figura 13 - Topologia para validação

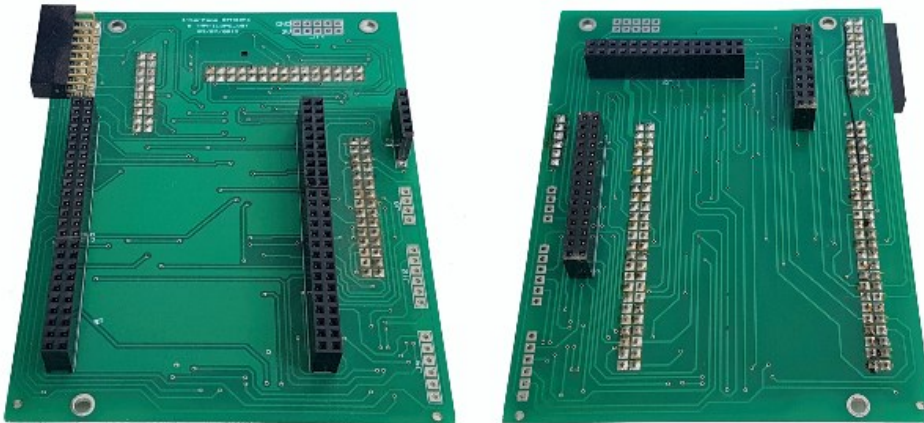


Figura 14 - Placa de interface entre Tartilope V4 e STM32F4-Discovery. Vista superior e inferior, respectivamente.

4.1.1.1 Bibliotecas para programação

Para programação do microcontrolador existem 3 bibliotecas fornecidas pelo fabricante, sendo elas: CMSIS (*Cortex Microcontroller System Interface Standard*), STD (*Standard Peripheral Libraries*) e HAL (*Hardware Abstraction Layer*). Estas podem ser classificadas de acordo com a proximidade entre a linguagem do programador com a linguagem do microprocessador. No início do trabalho a biblioteca utilizada foi a STD por não oferecer muitos *overheads*, ou seja, cabeçalhos e funções que apesar de ajudarem no desenvolvimento dos códigos demandavam maior processamento, e esta biblioteca atendeu muito bem as aplicações que foram sendo realizadas. Porém, a fabricante deixou de dar suporte à biblioteca e incentivou a utilização da HAL para os desenvolvimentos de código, e também informou que esta seria a biblioteca que seria oficialmente atualizada e suportada. De fato, ao longo do

trabalho, com as implementações do protocolo lwIP e com as atualizações do mesmo, principalmente na versão 2.0.2, foi necessária a adoção da biblioteca HAL para que o código com a lwIP instalado fosse executado corretamente.

Na Figura 15 pode ser observado de maneira geral a diferença para a inicialização da comunicação serial como exemplo, para cada uma das bibliotecas, destacando-se a quantidade de código necessária em cada uma delas e da vantagem em se utilizar a biblioteca HAL (Figura 15a).

<pre> void UART_Initialize(void) { /* UART Parameters */ UartHandle.Instance = USARTx; UartHandle.Init.BaudRate = 9600; UartHandle.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B; UartHandle.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1; UartHandle.Init.Parity = UART_PARITY_NONE; UartHandle.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE; UartHandle.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX; UartHandle.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16; /* UART Initialization */ if (HAL_UART_Init(&UartHandle) != HAL_OK) { Error_Handler(); } } </pre>	(a)	<pre> void USART_Configuration(void) { USART_InitTypeDef USART_InitStructure; USART_InitStructure.USART_BaudRate = 115200; USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b; USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1; USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No; USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None; USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx USART_Mode_Tx; USART_Init(Open_USART, &USART_InitStructure); USART_ITConfig(Open_USART, USART_IT_RXNE, ENABLE); USART_Cmd(Open_USART, ENABLE); } </pre>	(b)	
		<pre> uint32_t tmpreg = 0x00, apbclock = 0x00; uint32_t integerdivider = 0x00; uint32_t fractionaldivider = 0x00; RCC_ClocksTypeDef RCC_ClocksStatus; /* Disable */ USART1->CR1 &= ~(uint16_t)USART_CR1_UE; /* Deinit first */ RCC->APB2RSTR = RCC_APB2Periph; RCC->APB2RSTR &= ~RCC_APB2Periph; /* Init */ USART_Init(USARTx, &USART_InitStructure); tmpreg = USARTx->CR2; tmpreg &= ~(uint32_t)USART_CR2_STOP; tmpreg = (uint32_t)USART_InitStructure->USART_StopBits; USARTx->CR2 = (uint16_t)tmpreg; tmpreg = USARTx->CR1; tmpreg &= ~(uint32_t)CR1_CLEAR_MASK; tmpreg = (uint32_t)USART_InitStructure->USART_WordLength USART_InitStructure->USART_Parity USART_InitStructure->USART_Mode; ... </pre>		(c)

Figura 15 - Comparação entre as bibliotecas de programação. (a) HAL. (b) STD. (c) CMSIS.

4.1.1.2 Interrupções

O STM32F4-Discovery, assim como outros microprocessadores, possui o recurso de interrupção que possibilita que um certo evento pause a execução do programa principal e

execute uma tarefa de maior importância. Os eventos podem ser gerados de diversas maneiras, podendo ser por tempo (gerado por um timer interno, por exemplo) ou por uma interrupção externa lida em alguma entrada. Neste caso, vários recursos podem fazer essa interrupção como, por exemplo, as portas de comunicação.

É comum que as tarefas de um programa tenham importâncias diferentes e sejam executadas com base nesse requisito. O processador ARM do STM32F4-Discovery gerencia as interrupções com base em duas propriedades configuradas pelo usuário, sendo elas chamadas de prioridade e sub-prioridade. O parâmetro prioridade define a importância de um evento e quando o mesmo poderá interromper uma execução em andamento. Já o parâmetro sub-prioridade permite que eventos de mesma prioridade sejam ordenados hierarquicamente quando estiverem numa fila, ou seja, quando estiverem esperando a execução de uma tarefa mais importante.

Verificou-se que, por padrão, o funcionamento das interrupções no STM32F4-Discovery se dava somente pela sub-prioridade [52], ou seja, mesmo que configurados para interromper uma tarefa de menor importância, os eventos sempre esperavam a finalização desta última para ser executados. Após alguns testes e consulta na folha de dados do microcontrolador, foi encontrado um registro que por padrão fazia que o funcionamento das interrupções ocorresse somente por sub-prioridade. O registro é composto por 4 bits e cabe ao usuário especificar quantos deles serão destinados para prioridade ou sub-prioridade. Caso o registro tenha todos os bits configurados para sub-prioridade, o que ocorre por padrão, então não haverá interrupção de nenhum evento sobre outra tarefa e será possível somente o ranking das sub-prioridades em 16 níveis. Caso utilize-se 2 bits para prioridade e 2 bits para sub-prioridade, poderemos ter 4 níveis como opção para cada uma das propriedades.

Novamente, foram realizados alguns testes para confirmação deste comportamento, e verificou-se que com a configuração do registro tanto as interrupções geradas num *clock* interno, como também as interrupções pelas portas de comunicação, de fato pausaram a execução em andamento e foram imediatamente interpretadas pelo processador.

Tal teste foi fundamental para o entendimento e conhecimento das capacidades do microcontrolador e que serão frequentemente utilizadas no decorrer do trabalho.

4.1.1.3 Reconhecimento de conexão do cabo Ethernet

Uma característica importante dos dispositivos de comunicação é a capacidade de estarem preparados para se conectarem na rede no momento em que a mesma esteja disponível, após uma reinicialização da rede, por exemplo, ou também quando um cabo é religado ao equipamento.

No STMF407-Discovery, notou-se que esta detecção não estava funcionando de maneira adequada. No código suportado pelo fabricante para o microcontrolador a abordagem para detecção de conexão do cabo era realizada por *pooling*, ou seja, o sistema consultava de tempos em tempos o estado da rede e somente quando esta consulta ocorrer é que se poderá tomar as devidas ações. Na maior parte dos sistemas atuais, a abordagem para esta detecção de conexão é feita por interrupção, onde o sinal de uma I/O gera uma pausa na execução do programa que primeiramente verifica sua prioridade e após isso realiza a tarefa destinada para este tipo de ocorrência.

Após a reprogramação do código, adequando-o para o comportamento por interrupção, viu-se que o sistema ainda não estava funcionando adequadamente, o que levou a um maior aprofundamento nas verificações das ligações e hardware utilizado. Ao consultar a folha de dados do adaptador de rede utilizado foi observado que o chip Ethernet apesar de possuir uma I/O específica para o sinal de interrupção, o fabricante não incluiu no projeto/fabricação da placa a ligação (trilha) à um pino de saída (Figura 16).

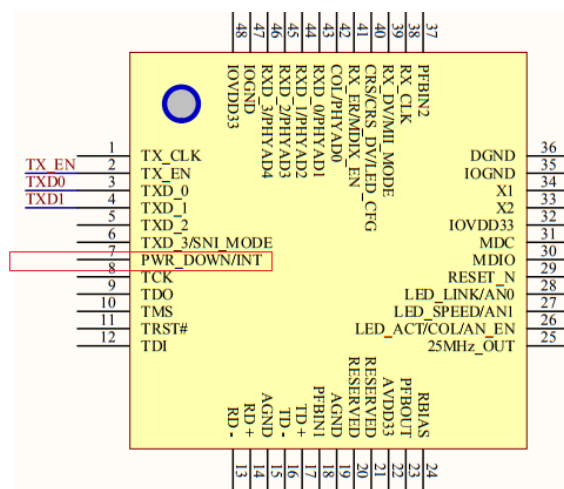


Figura 16 - Chip DP83848 do módulo PHY com o pino de interrupção [53].

Após essa constatação, foi realizada manualmente a ligação deste pino (Figura 17) e o comportamento por interrupção com o código gerado funcionou adequadamente quando o cabo Ethernet era desligado ou religado ao sistema, permitindo assim o tratamento de erros que poderiam ocorrer na interrupção da comunicação, e também para a geração desta informação ao usuário ou log de rede.

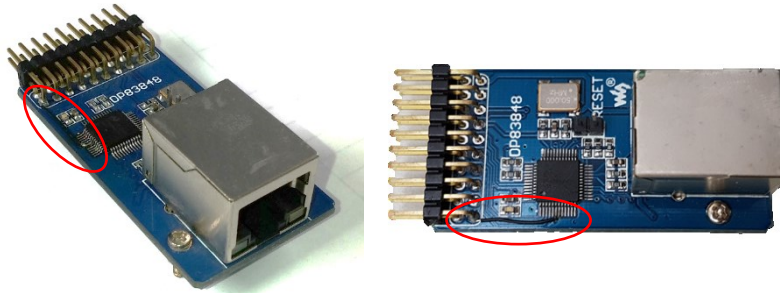


Figura 17 - Módulo PHY com a conexão do pino de interrupção

4.1.2 Light Weight IP

A fim de testar e entender mais a fundo o funcionamento da pilha lwIP, foram realizados alguns estudos de implementação e desempenho com o microcontrolador STM32F4-Discovery visando maior aproximação com as ferramentas e com a própria pilha em si.

Os testes iniciais objetivaram averiguar o tempo de resposta e a integridade das mensagens transmitidas para o microcontrolador que estava na maior parte do tempo ocioso, ou seja, nenhum outro processamento iria influenciar no recebimento das mensagens. A arquitetura utilizada foi simplificada a um microcontrolador, um roteador e um PC e o protocolo utilizado foi o TCP, visando a confiabilidade na entrega das mensagens.

Para os ensaios, foi configurado um servidor TCP com a lwIP e foram adotadas duas abordagens para o envio das mensagens. A primeira é o envio de séries de pacotes variando-se o tamanho destes para cada uma das séries. A outra abordagem é avaliar o comportamento quando estas mesmas séries são enviadas de múltiplos dispositivos ao mesmo tempo.

Os pacotes no protocolo TCP são compostos por dados de cabeçalho com 54 bytes mais o dado da mensagem em si, que pode ter até 1460 bytes. Foram definidos quatro tamanhos de mensagens para os ensaios: 3, 480, 970 e 1460 bytes, que representam aproximadamente o mínimo, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$ e o máximo, do tamanho permitido para cada pacote, respectivamente.

Em cada série os tempos entre os envios das mensagens também variaram de 400 ms até 100 ms, com o intuito de verificar se haveria algum travamento das mensagens pelo carregamento do microprocessador, porém, como não foi percebido nenhuma diferença entre estes valores, adotou-se somente o tempo de 100 ms como referência, já que este é um tempo aceitável para aplicações de monitoramento.

No gráfico abaixo (Figura 18) são apresentados os tempos de respostas médios encontrados e também o desvio padrão para cada série com diferentes tamanhos dos pacotes.

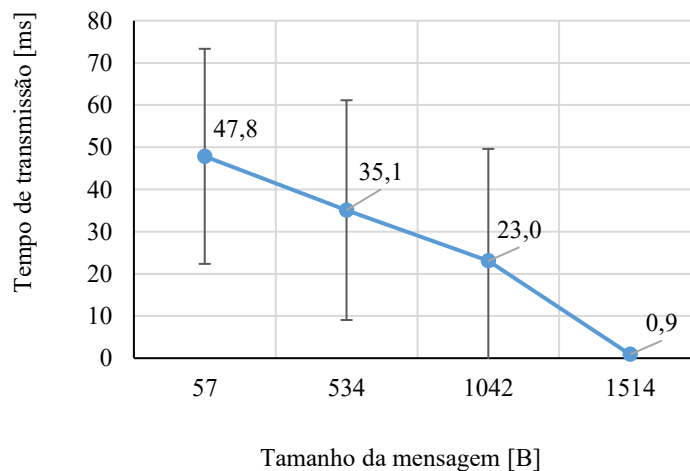


Figura 18 - Tempo médio de resposta em comunicação de um único cliente TCP com pacotes de diferentes tamanhos

O que se pode perceber de imediato nos ensaios é que conforme a quantidade de informações aumentava, mais rápido o sistema respondia para cada envio, o que é o oposto do que se espera num sistema de comunicação. Notou-se também que o desvio padrão para as mensagens que não tinham o tamanho máximo era bastante acentuado.

Nos ensaios com múltiplas conexões, 5 clientes simultaneamente, os testes realizados mostraram resultados praticamente iguais (Figura 19).

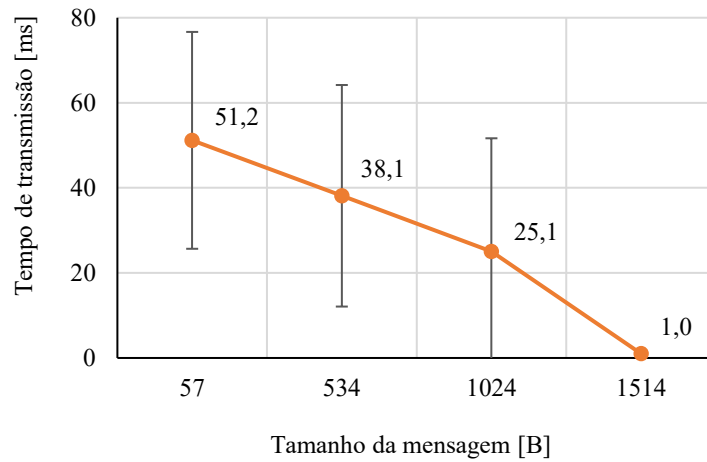


Figura 19 - Tempo médio de resposta em comunicação de 5 clientes simultâneos TCP com pacotes de diferentes tamanhos

Após algumas investigações no funcionamento da lwIP, encontrou-se o parâmetro `ACK_NOW` que esclarecia o porquê dos resultados encontrados. Este parâmetro faz parte do algoritmo Nagle [16] que define se a resposta de recebimento de um pacote será feita imediatamente, ou se esta informação dependerá do preenchimento do buffer ou ainda do tempo limite para resposta.

Esta *flag*, por padrão, é mantida desabilitada fazendo com que somente as mensagens com o tamanho máximo possuíssem o menor tempo de resposta, já que quando elas eram recebidas pelo microcontrolador o buffer de recebimento era imediatamente preenchido e a *flag* `ACK_NOW` sempre era acionada. Para os outros casos, como as mensagens não preenchiam o buffer, o microcontrolador utilizava do tempo que restava para esperar por mais algum pacote com o intuito de habilitar a `ACK_NOW` somente uma vez. Essa espera almeja otimizar a utilização da rede condensando as respostas de vários pacotes que cheguem dentro do limite de tempo em somente uma mensagem.

Após a alteração na lwIP ser configurada para que a *flag* `ACK_NOW` ficasse sempre habilitada, todos os pacotes foram respondidos imediatamente e o tempo de resposta ficou em aproximadamente em 0,8 ms para qualquer tamanho de mensagem, conforme a Figura 20.

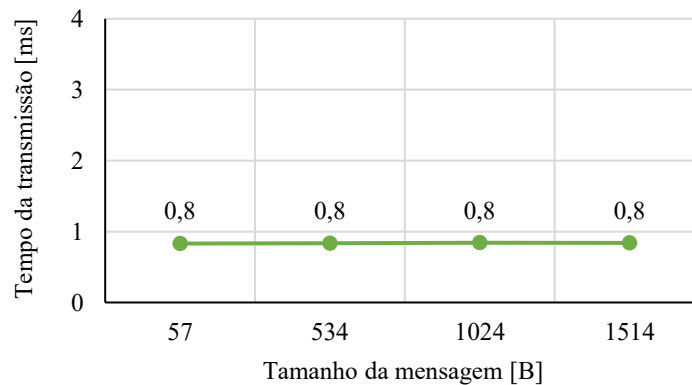


Figura 20 - Tempo médio de resposta em comunicação de um único cliente TCP com pacotes de diferentes tamanhos

Com esses resultados viu-se que o sistema ainda se encontra dentro dos requisitos, ou seja, possibilita aquisições melhores que 300 Hz e com baixa perda de informações (3.1.1 ANÁLISE DE REQUISITOS), e ainda pode ser desenvolvido e aplicado para a integração dos equipamentos.

4.1.3 ZigBee

A comunicação em rede sem fio se difere bastante em relação a rede cabeada quanto ao meio de transmissão de dados, mas o tratamento e o modo de checagem da integridade das mensagens podem ser aproveitados de diversas formas. Portanto, o maior foco da pesquisa é a seleção de tecnologias que podem gerenciar da melhor maneira uma rede sem fio. Adiante serão expostos os testes e ensaios para desenvolvimento de uma rede utilizando a tecnologia ZigBee.

O ZigBee é um protocolo aberto e utilizado principalmente em sistemas embarcados e com baixo consumo de energia. O protocolo permite tanto configurações simples onde a necessidade é somente a eliminação dos fios em uma comunicação serial como também a utilização em sistemas que com necessidade de vários módulos conectados e trocando informações entre si, ou retransmitindo mensagens para aumentar o alcance da rede.

Em sistemas automatizados é comum que exista diversas redes e diferentes protocolos de comunicação num mesmo sistema, e muito disso se dá pela necessidade das aplicações, por exemplo, a que se tem na troca de informações entre um controle/IHM e uma central de comando que possuem somente dois nós de rede, já no gerenciamento das informações de processo pode-se ter diversos nós que acessam estas informações de maneira simultânea. Os

ensaios foram realizados embasados nessas considerações visando sua aplicação numa fonte de soldagem.

4.1.3.1 Ensaio rede ZigBee em malha

Para a configuração dos módulos foi utilizado o software XCTU (Figura 21) disponibilizado pelo fabricante que também inclui um terminal para comunicação serial com os dispositivos.

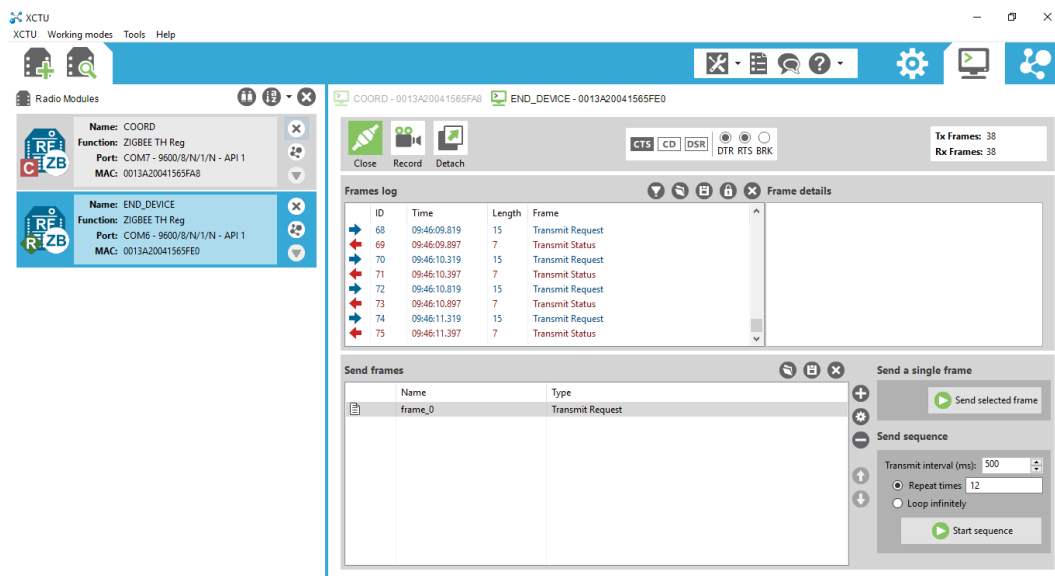


Figura 21 - Software XCTU de configuração dos módulos XBee ZigBee.

Foram utilizados 3 módulos XBee ZigBee para este ensaio (Figura 22), sendo configurados da seguinte forma:

- Módulo 1 configurado como coordenador da rede (COORD) conectado ao PC por um adaptador de ZigBee-USB Parallax 32400.
- Módulo 2 configurado como um nó comum de rede (END_DEVICE), ou seja, não assumirá outra função na rede quando deixar de existir um coordenador na rede e também não retransmitirá mensagens como um roteador. Este também foi conectado a um PC com o adaptador ZigBee-USB.
- Módulo 3 configurado como roteador (ROUTER) ligado ao microcontrolador STM32F4-Discovery pelos pinos de alimentação e comunicação UART.

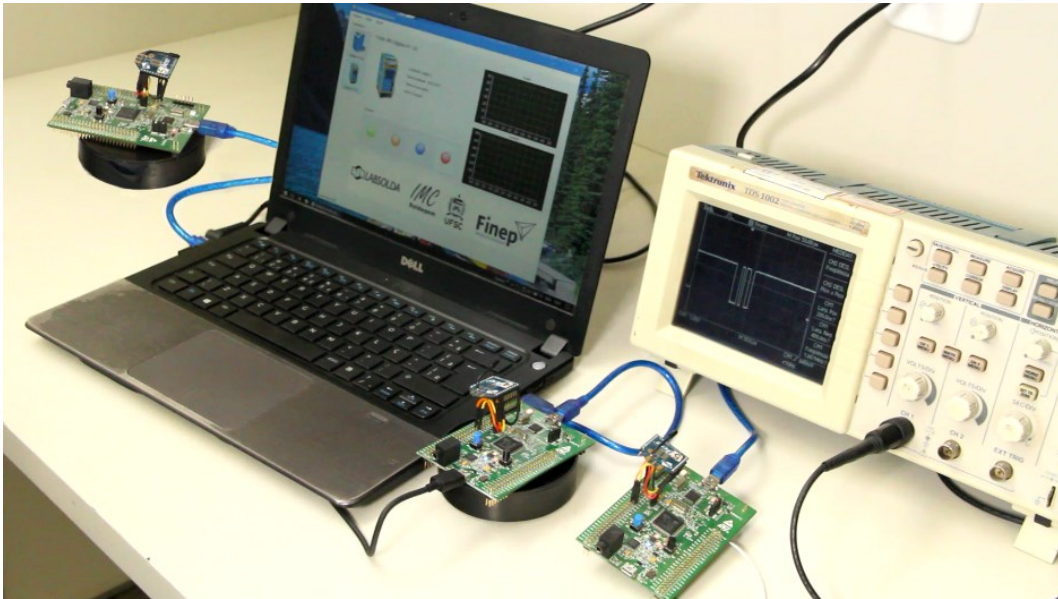


Figura 22 – Ensaio com 3 módulos XBee ZigBee.

O microcontrolador foi programado para indicar por meio dos LEDs quando as mensagens entregues contivessem as informações: 0x30, 0x31, 0x32, 0x33 ou 0x34, sendo que os LED apagam para 0x30, e acenderiam individualmente para cada uma das outras respectivas mensagens.

No próprio software de configuração dos módulos, é possível criar um frame com as informações de cabeçalho e *checksum* necessárias para o envio correto da mensagem e também escolher por qual dos módulos conectados pela USB se enviará a mensagem. Os testes mostraram que as mensagens foram entregues com um tempo de resposta de 60 a 100 ms numa distância entre dispositivos de menos de um metro.

Esses valores condizem com as características da rede ZigBee e demonstram que, para algumas aplicações na soldagem, se bem dimensionadas, o protocolo demonstra potencial para ser utilizado trazendo os benefícios da ausência de fios e baixo consumo de energia.

4.1.3.2 Ensaio rede ZigBee no modo ponto-a-ponto

Uma das características que mais tem trazido para a indústria os módulos sem fio é a simplicidade em converter alguns sistemas com cabos para wireless (Figura 4). Os módulos XBee ZigBee permitem a configuração dos mesmos para que eles transmitam a informação de forma direta por meio de ondas de rádio. O fabricante chama este modo como *transparent mode*

por enviar as mensagens exatamente da mesma forma como elas foram passadas ao módulo, sem a necessidade de encapsular as informações com endereços e rotas para a entrega da mensagem.

Com somente dois módulos XBee ZigBee foi feita a configuração dos dispositivos formando uma rede entre um PC e o microcontrolador. Este último foi alimentado por uma bateria externa fazendo o sistema portátil e independente do PC, como o propósito do sistema wireless.



Figura 23 - Comunicação wireless substituindo comunicação serial cabeada

Para os testes de tempos de resposta foi utilizado o próprio terminal do software XCTU que permite o envio sequencial de frames definindo um intervalo de tempo entre os envios. Para tanto, de maneira decrescente, os tempos foram alterados a partir de 200 ms até que as mensagens passassem a apresentar alguma instabilidade. O sistema se comportou de maneira adequada para tempos até 15 ms no envio de apenas um caractere, para tempos menores que este, ainda houve a recepção das mensagens por parte do microcontrolador, mas notou-se que os dados eram armazenados no buffer do módulo de envio e somente recebidos quando a mensagem anterior havia sido processada.

Foi verificado também, tempos para o envio de mensagens maiores, conforme as usualmente utilizadas em sistemas inteligentes como em células de soldagem. Neste ensaio foi possível verificar que houve a troca de mensagens de forma íntegra, mas como esperado os tempos foram reduzidos. Entretanto, apesar do aumento considerável no tamanho das mensagens, que agora foram de 64 bytes, os tempos aumentaram somente para 22 ms. Com isso, o sistema se mostrou viável para aplicações que os tempos de respostas não são críticos e que podem ter sua flexibilidade aumentando com a eliminação dos cabos para a comunicação.

4.2 DESENVOLVIMENTO DE UM GATEWAY ETHERNET

O Gateway Ethernet pode ser entendido como uma ponte entre o PC e fonte de soldagem com a função de traduzir e adequar as informações da Ethernet mantendo uma comunicação com a fonte que, originalmente disponibilizava uma comunicação serial RS-232. Esse sistema teve por objetivo no trabalho, permitir a comunicação em rede entre um PC e a fonte de soldagem conforme a mesma é composta atualmente, ou seja, sem intervenção ao hardware do mesmo e utilizando somente os recursos implementados já disponíveis. Na Figura 24 é apresentado os principais componentes para a comunicação entre a fonte de soldagem e um PC. Na imagem pode-se observar a comunicação direta entre o PC e a MCU, porém, o sistema também pode ser configurado para a MCU se conectar a um roteador e assim ser acessada por até 8 computadores simultaneamente, como será visto mais adiante.

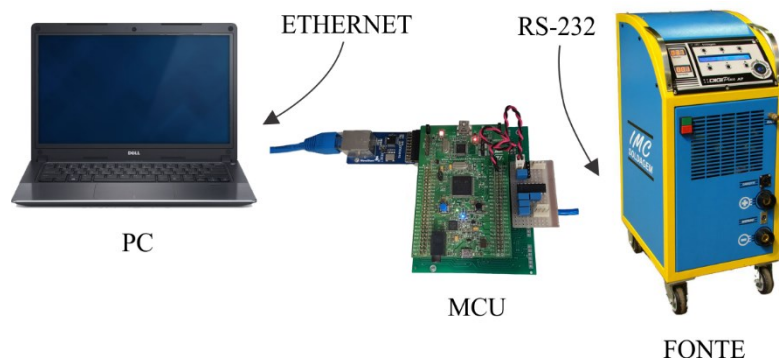


Figura 24 - Sistema Gateway Ethernet

4.2.1 Protocolo de comunicação da fonte Digiplus A7

A fonte possui um canal de comunicação serial RS-232, no qual opera com baudrate de 57600 b/s (bit por segundo) e com checagem de erro (paridade) do tipo par, ou seja, o último bit em uma transmissão de dados é resultado da contagem de bits iguais a 1 no byte, caso exista um número par de 1's, o bit de paridade será igual a 0, caso contrário, será 1.

A fabricante utiliza um protocolo próprio na camada de aplicação que possibilita o envio de comandos para a fonte. Ela opera no modo escravo e sempre responde com uma mensagem de recebimento quando lhe é enviado um comando, ou responde com um valor de variável pré-definido de acordo com o tipo do comando mais a informação de recebimento [54].

Os frames de comunicação são classificados em 5 tipos correspondentes aos modos de comunicação da fonte, que são:

- a) Acesso a dados da memória sem alteração do display da fonte;
- b) Acesso a dados da memória alterando o display da fonte;
- c) Envio de variáveis para a camada do display, que posteriormente será tratada pelo controle do processo.
- d) Envio de variáveis diretamente para a camada de controle do processo, copiando-a para o display.
- e) Envio de variáveis diretamente para a camada de controle do processo sem a criação de cópia para o display.

Todos os frames se iniciam com um byte chamado de Identificador (ID) seguido de um byte chamado de comando (CMD). Alguns tipos de mensagens além do ID e do CMD possuem mais dois bytes com informações adicionais, normalmente valores de parâmetros.

Por parte da fonte, a mesma sempre realizará um retorno para mensagens íntegras recebidas. Caso o dispositivo mestre não receba nenhuma informação da fonte após o envio de um comando, é considerado que a mensagem foi corrompida e cabe ao mesmo reiniciar a comunicação com um envio de dois bytes (em hexadecimal FF FF) e enviar novamente a mensagem de comando.

Dependendo da mensagem que chega na fonte, a mesma poderá responder somente com a informação de recebimento com um byte somente (em hexadecimal 4F) ou poderá além de informar o recebimento preceder o byte 4F com alguns bytes de resposta a uma requisição. Por exemplo, ao receber um pedido de leitura de corrente, um frame formado por 2 bytes (ID + CMD: 63 30), a fonte irá responder 5 bytes (Repetição do comando recebido + valor de corrente + informação de recebimento: 63 30 XX YY 4F).

No Quadro 2 podemos ver um exemplo de comunicação com a fonte onde há uma a inicialização de um processo de soldagem e leitura do valor de corrente.

Dispositivo	Fonte	Descrição
FF FF FF FF	→	Sincroniza Transmissão
	← 4F	Confirmação de recebimento
3C 44 A 8 06	→	Muda menu para curto circuito controlado habilitado
	← 4F	Confirmação de recebimento
3C 45 58 00	→	Disparo do processo (INICIO SOLDA)
	← 4F	Confirmação de recebimento
66 02 2D 00	→	Envia velocidade de arame (4.5 m/min) e altera o display da fonte
	← 4F	Confirmação de recebimento
63 30	→	Ler Corrente Média
	← 60 30 XX YY 4F	Repetição do comando recebido + valor de corrente + confirmação de recebimento
3C 45 5A 00	→	Disparo do processo (FIM SOLDA)
	← 4F	Confirmação de recebimento

Quadro 2 - Exemplo de comunicação com a fonte Digiplus A7.

4.2.2 Firmware Gateway Ethernet para STM32F4-Discovery

Sendo o maior propósito do Gateway Ethernet enviar e receber mensagens entre as duas interfaces, e devido à baixa taxa de transferência da RS-232, alguns recursos de programação e hardware devem ser considerados para contornar essa problemática [55]. O principal deles é o controle do fluxo de dados que, por meio de buffers, armazenam temporariamente as mensagens que serão enviadas (Figura 25) e as mensagens recém-chegadas (Figura 26).

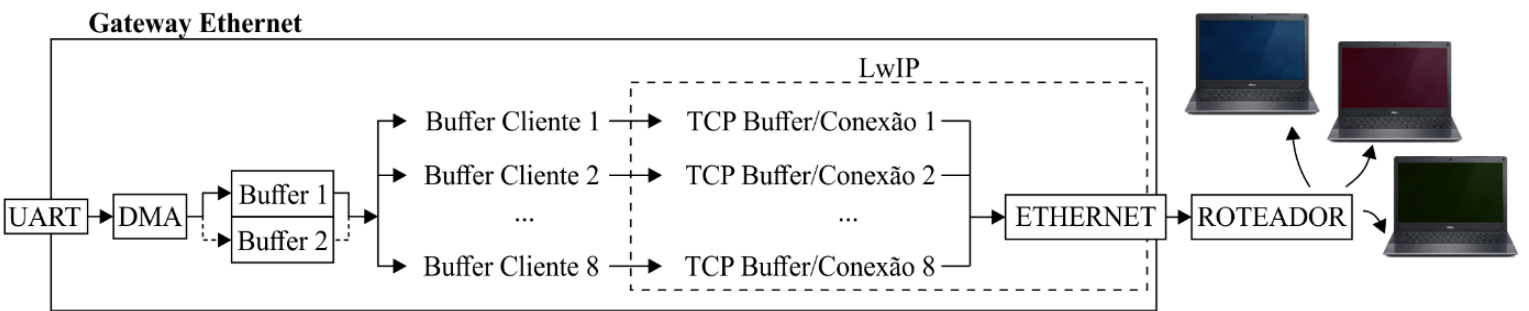


Figura 25 - Diagrama de envio de mensagens pela fonte

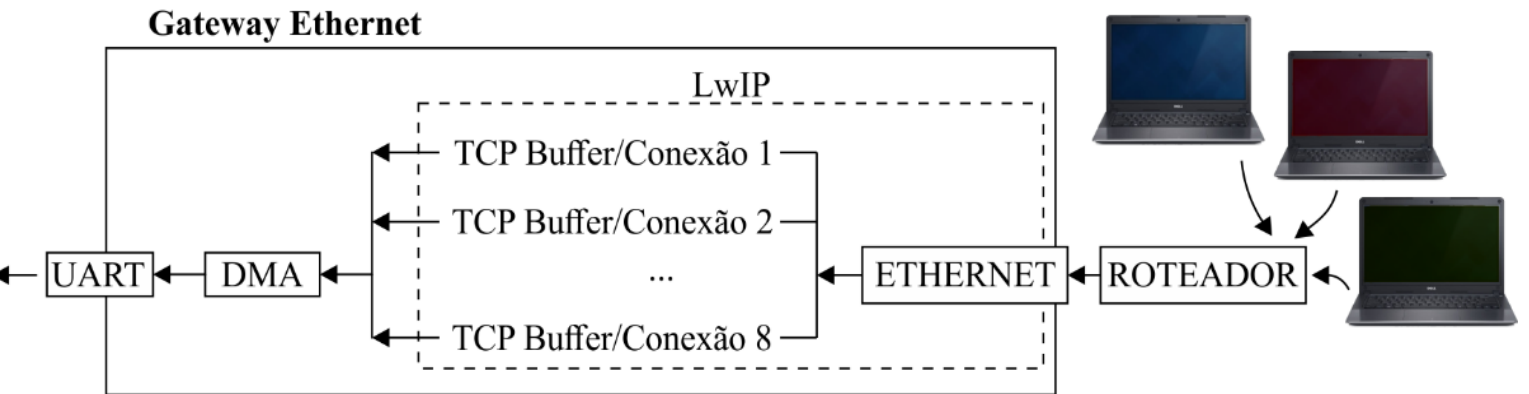


Figura 26 - Diagrama do recebimento de mensagens pela fonte

4.2.2.1 Sentido de comunicação RS-232 para Ethernet

A MCU foi programada para que ao ser recebida alguma mensagem pela RS-232/UART, a mesma gere uma interrupção no programa em execução e trate imediatamente a mensagem recebida. Seu funcionamento se dá pela seguinte forma: como a fonte não utiliza em seu protocolo nenhum indicador de início e/ou fim da mensagem, foi utilizado o recurso de *idle line detection* (detecção de ociosidade do barramento) da MCU, ou seja, quando se identifica que pararam de chegar mensagens por um tempo de ao menos um byte (tempo que leva para se transferir um byte) [56], então o periférico da UART irá acionar uma *flag* informando que uma mensagem acabou de ser recebida.

No momento seguinte, foi configurado para entrar em ação o periférico de acesso direto à memória (*direct memory access/DMA*) para se obter maior desempenho e aproveitamento dos recursos do microprocessador. O DMA tem por objetivo transferir os dados do periférico de comunicação serial (UART) para a memória RAM sem que haja a necessidade de o microprocessador realizar esta tarefa. A vantagem no uso do DMA é o ganho em performance na comunicação serial (que no contexto geral é um gargalo se comparada à Ethernet) devido ao gerenciamento mais otimizado na transferência de dados entre o periférico e a memória RAM, assim como um pequeno ganho ao não se atribuir essa atividade ao microprocessador, deixando-o livre para outras tarefas.

Somente após a transferência completa dos dados pelo DMA é que o mesmo aciona a *flag* que de fato é direcionada ao microprocessador para o tratamento do novo frame. Na memória RAM foram implementados dois buffers funcionando no modo “ping-pong”, ou seja, quando um deles está recebendo os dados da serial, o outro está disponível para ser utilizado pelo processador. Quando chega uma nova mensagem, esta é direcionada ao segundo buffer e o processador faz a leitura e tratamento do primeiro buffer.

Como o protocolo atual da fonte não possui nenhum tipo de identificação de frames, adotou-se a lógica de que todo frame recebido pela UART fosse encapsulado individualmente e copiado para a lwIP que gerencia as conexões TCP e tratará de enviar as mensagens para todos os dispositivos conectados (essa etapa será mais detalhada a seguir no item 4.2.2.3 ESTABELECIAMENTO DE CONEXÃO). Cabe aqui ressaltar que a conexão Ethernet entre o Gateway Ethernet e o PC pode ser realizada por meio de um roteador (como apresentado anteriormente na Figura 25), possibilitando a conexão de até 8 dispositivos devido a quantidade de memória disponível para os buffers na MCU, ou pode ser realizada com uma conexão direta

entre esses dispositivos. Neste último caso, como visto no item 3.2.5.1 REDE CABEADA, não é necessário o uso de cabos *crossover* devido a tecnologia Auto-MDIX do adaptador de rede.

4.2.2.2 Sentido de comunicação Ethernet para RS-232

Como a comunicação ethernet é realizada pela pilha lwIP, se faz necessária a configuração da mesma para que seja possível a comunicação com os outros dispositivos. No desenvolvimento do Gateway Ethernet foi implementado como recurso da lwIP um servidor TCP, que irá receber as mensagens que serão repassadas pela RS-232, e um servidor UDP, que tem por finalidade ajudar a estabelecer uma conexão com a MCU.

As mensagens enviadas para fonte por meio do Gateway Ethernet são recebidas pela lwIP e armazenadas em seus buffers internos. Convenientemente, o protocolo TCP utilizado, também possui um controle de fluxo de dados bastante útil que ao detectar um preenchimento completo do buffer num dos dispositivos, pode diminuir a taxa de transferência, ou até mesmo pará-la por instantes até que o buffer do dispositivo esteja apto a receber mais informações. Na prática, isto só ocorre quando a MCU recebe muitas informações quando diversos dispositivos estão conectados a ela e não há tempo de liberar o buffer.

No momento seguinte ao recebimento das mensagens pela lwIP, o microprocessador verifica o buffer “ping-pong” que não está em uso pela UART e atribui a ele o endereço de memória das mensagens recebidas, fazendo com que não haja a necessidade de cópia dos dados. A partir daí o controle por *pooling* do microprocessador sobre o buffer irá verificar a existência de dados a serem enviados e também a disponibilidade do periférico UART, caso existam informações no buffer e a UART esteja disponível, então será acionado um comando para que o DMA realize a tarefa de alocar os dados no periférico UART e assim enviados.

4.2.2.3 Estabelecimento de conexão entre dispositivos (PC e fonte)

Como mencionado anteriormente, foi implementado um servidor TCP no Gateway Ethernet para a troca de informações com os dispositivos em rede. Para tal, o sistema precisa necessariamente de um endereço IP para que o mesmo possa ser identificado pelos outros dispositivos da rede.

Existem basicamente duas maneiras suportadas pela lwIP para se atribuir um IP para o dispositivo. A primeira delas é a escolha de um IP fixo já na programação do firmware, o que

implica na necessidade de que quando o Gateway Ethernet seja conectado numa rede existente, por meio de um roteador, por exemplo, os endereços IP sejam compatíveis e que o IP fixo programado esteja disponível. Esta implicação, apesar de auxiliar no desenvolvimento e testes iniciais do sistema, é inviável ao se pensar numa solução mais ampla, onde não se conhecerá a rede em que o Gateway Ethernet será conectado e poderá não ser possível alterar o IP do dispositivo que se comunicará com o sistema.

A segunda maneira é configurar a lwIP e habilitar o uso de um pedido de IP para um servidor DHCP durante a inicialização do sistema. O servidor DHCP é responsável por gerenciar os endereços de IP de uma rede e é normalmente implementado em roteadores, sendo assim, dispositivos que se conectem na rede recebem automaticamente IP's compatíveis. No caso de uma conexão direta entre o Gateway Ethernet e um PC, ou seja, quando não houver um roteador com DHCP implementado, foi decidido no projeto que fosse atribuição do computador fornecer um IP para o sistema.

Servidor DHCP é um protocolo da camada de aplicação e para que seja possível a comunicação com dispositivos ainda sem IP, ele utiliza o protocolo UDP. Este protocolo não é orientado a conexão, diferentemente do protocolo TCP, e apesar de não possuir controles de entrega de mensagens e controle de fluxo de dados, ele pode ser usado para permitir a atribuição de um endereço IP válido para o Gateway Ethernet. Tanto a utilização do recurso DHCP como o protocolo UDP utilizado por ele são contemplados pela pilha lwIP, necessitando somente de sua configuração na implementação do firmware.

Juntamente a utilização do DHCP, se faz necessária a utilização de um procedimento/recurso para se descobrir qual o endereço atual do Gateway Ethernet e assim seja possível uma comunicação TCP com o mesmo. Este procedimento no projeto foi realizado com a implementação de um servidor UDP, ou seja, uma aplicação no firmware que, ao identificar uma mensagem específica na rede responde ao dispositivo solicitante informações sobre o nome do Gateway Ethernet e em qual fonte o mesmo está instalado, assim como endereço IP atual do sistema.

Na Figura 27 é possível verificar um exemplo deste procedimento, em que um dispositivo conectado a um roteador, assim como o Gateway Ethernet, envia uma mensagem de broadcast (uma mensagem para todos os dispositivos da rede) pela porta 8181 com o conteúdo "STM32F4". No momento em que o Gateway Ethernet identifica esta mensagem no barramento, é gerada uma resposta na forma "(endereço IP), (MAC), (Descrição)" e enviada ao

endereço de IP que originou a mensagem. Dessa forma, qualquer aplicação poderá buscar pela existência do Gateway Ethernet na rede.

	Time	From IP	From Port	To IP	To Port	Method
1	📡 09:12:39.649	192.168.0.100	8181	You	58622	UDP
2	📡 09:12:39.644	You	58622	255.255.255.255	8181	UDP

Error	a	b	ASCII	c
	192.168.0.100, 02-00-00-00-00-01, STM32F4-Discovery S/N 2017/001			
	STM32F4			

Figura 27 – Requisição do endereço de IP do Gateway Ethernet conectado na rede. a) Endereço de IP. b) Endereço MAC. c) Descrição da fonte/Gateway Ethernet.

4.2.3 Ensaio com Gateway Ethernet

Com o estabelecimento da comunicação por meio do Gateway Ethernet, foram realizados ensaios em bancada utilizando uma giga de testes (Figura 28). Esse sistema possui a parte lógica da fonte de soldagem com a adição de um código específico no firmware que simula um processo de soldagem em execução. Especificamente, quando se faz um “disparo de soldagem” o sistema simula um processo MIG CCC com corrente média de 126 A, que possibilita a leitura dos parâmetros do processo durante a simulação.



Figura 28 - Bancada de ensaio com a giga de testes (A). Computador (B) e Gateway Ethernet (C) conectados a um roteador (D).

Utilizando o software Connect (apresentado no capítulo 4.3 DESENVOLVIMENTO DO SUPERVISÓRIO) foi possível a interação com a fonte de soldagem, aquisição dos sinais

e exportação de dados. Com isso, foram analisadas algumas características desse modo de comunicação, ou seja, com a utilização do Gateway Ethernet entre um PC e a fonte de soldagem. A primeira delas é a taxa de resposta que, de acordo com o arquivo de aquisição, foi de 10 Hz (100 ms) para cada valor solicitado, ou seja, como o sistema só responde o valor de uma grandeza para cada solicitação, foi necessário intercalar os pedidos da leitura de tensão e corrente, que efetivamente fez com que a aquisição dos sinais fosse de 5 Hz (Figura 29).

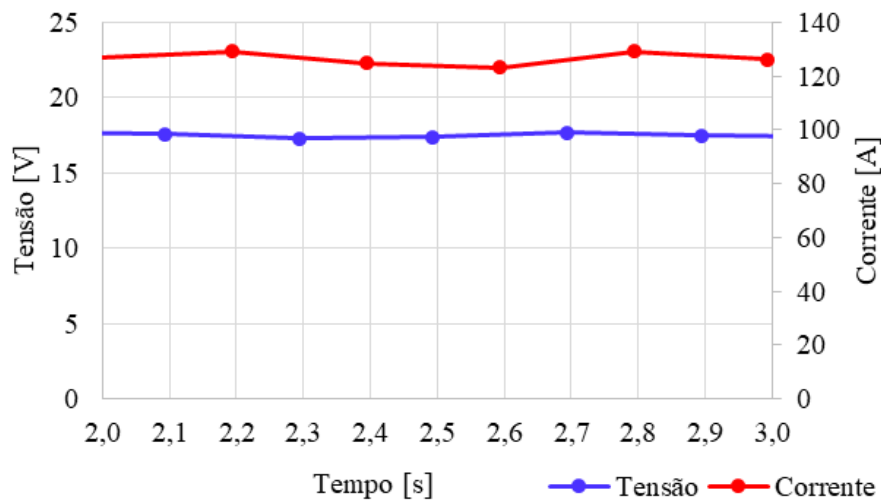


Figura 29 – Detalhe da aquisição do processo MIG CCC por meio do Gateway Ethernet

Outra característica observada foi a “perda” de alguns valores durante a aquisição. De fato, o que acontece é que como todas as solicitações compartilham o mesmo meio, quando se requisita o *status* da fonte, por exemplo, a aquisição dos sinais de soldagem é pausada por um instante até que o sinal de *status* seja respondido (Figura 30).

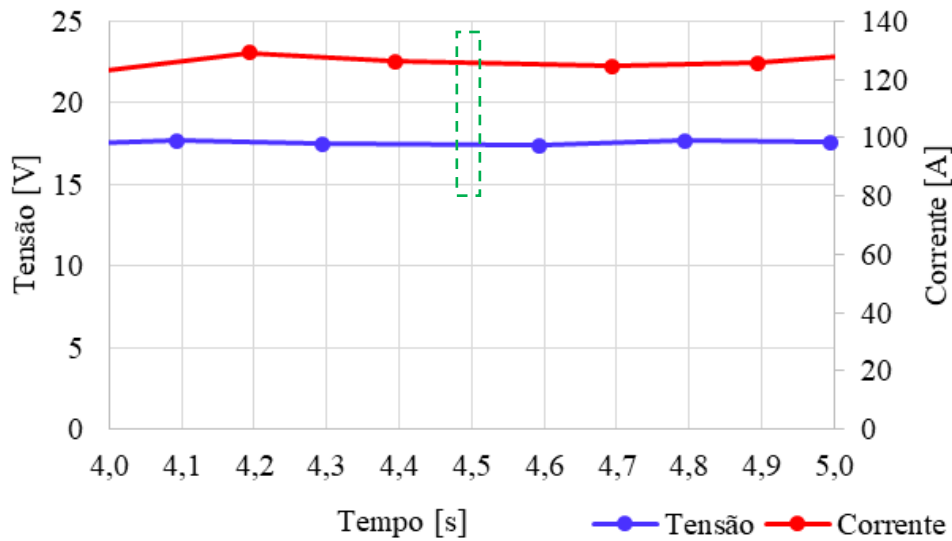


Figura 30 - Perda de dados de aquisição devido a pausa gerada por outros tipos de solicitações.

Apesar da baixa taxa de aquisição, abaixo inclusive dos 300 Hz indicados por MOTA [28] para caracterização do processo, o gráfico da Figura 31 possibilita a análise dos valores médios do processo e, eventualmente, validar ou não o processo de acordo com uma especificação do processo de soldagem (EPS).

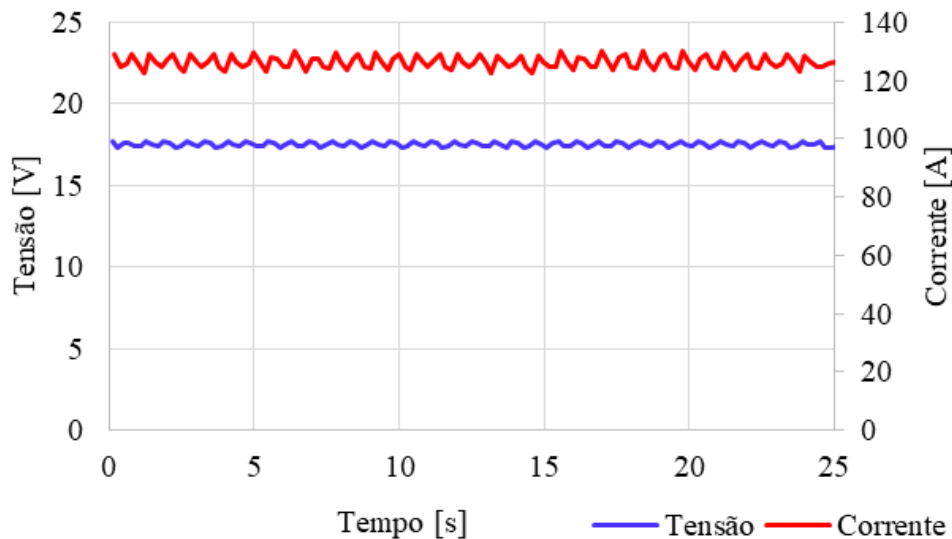


Figura 31 - Aquisição do processo MIG CCC por meio do Gateway Ethernet.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO SUPERVISÓRIO

Com o desenvolvimento da plataforma de comunicação que permitisse a utilização do sistema se comunicando em rede e na intenção de se aproximar ainda mais dos conceitos da Indústria 4.0 foi criado um software que pudesse interagir com o usuário final, fornecendo ferramentas de análise, controle e acompanhamento de processos relacionados à soldagem.

Como base para o levantamento dos recursos que pudessem ser implementados nesse software, foi realizado um *benchmarking* que levantou os principais recursos das soluções em Indústria 4.0 apresentadas por três grandes fabricantes de tecnologia para soldagem, sendo elas: Power Wave da Lincoln Electric [57], Insight Welding Intelligence [58] e Fronius Xplorer da Fronius International [59]. Após esse levantamento, foi realizada uma análise de viabilidade e adequabilidade que restringiu as funções almejadas para:

- Apresentar informações sobre o dispositivo conectado;
- Mostrar status do dispositivo;
- Controlar parâmetros de processo;
- Armazenar dados em nuvem ou localmente;
- Apresentar gráficos das principais grandezas de soldagem;
- Aquisitar dados em tempo real;
- Mostrar indicadores de produtividade/performance;
- Exportar dados.

Além destes recursos, foram listados requisitos funcionais de software para nortear o desenvolvimento em conceitos modernos de aplicações, de responsividade do sistema e também à experiência do usuário [60][61]. Dentre os requisitos, cita-se:

- Instalador off-line;
- Verificador de atualização;
- Leiaute adaptativo;
- Gravar configurações da aplicação.

Por último, como comentado no capítulo anterior, devido a necessidade de um servidor DHCP na rede, o software deve possuir este recurso implementado. Prioritariamente o DHCP

da aplicação só será utilizado quando não houver nenhum outro na rede, ou seja, quando a conexão for realizada diretamente ao computador.

4.3.1 Concepção e funcionamento

O software desenvolvido foi nomeado de Connect e possui uma interface com o usuário bastante minimalista. A tela principal (Figura 32) é basicamente composta por um painel ao lado esquerdo com dois botões que dão acesso ao menu de dispositivos e acesso aos dados salvos de todos os dispositivos, respectivamente. Na parte inferior aparecem os ícones de home, configurações e ajuda. Ao centro, o espaço é reservado para a apresentação dos conteúdos e informações conforme a navegação do usuário.

O botão “Dispositivos” apresenta uma tela (Figura 33) com os dispositivos já incluídos pelo usuário (nas imagens e ao longo do texto representados pelas fontes de soldagem) além da possibilidade de inclusão ou remoção dos mesmos. No carregamento desta tela, é realizada uma consulta rápida na rede verificando a disponibilidade dos dispositivos, indicando os *on-line* e *off-line* e nos dois casos é possível adentrar nas respectivas telas para consulta de informações e status. Os dispositivos *on-line* habilitarão nessa tela a função de supervisor que permitirá visualização e comandos remotos.

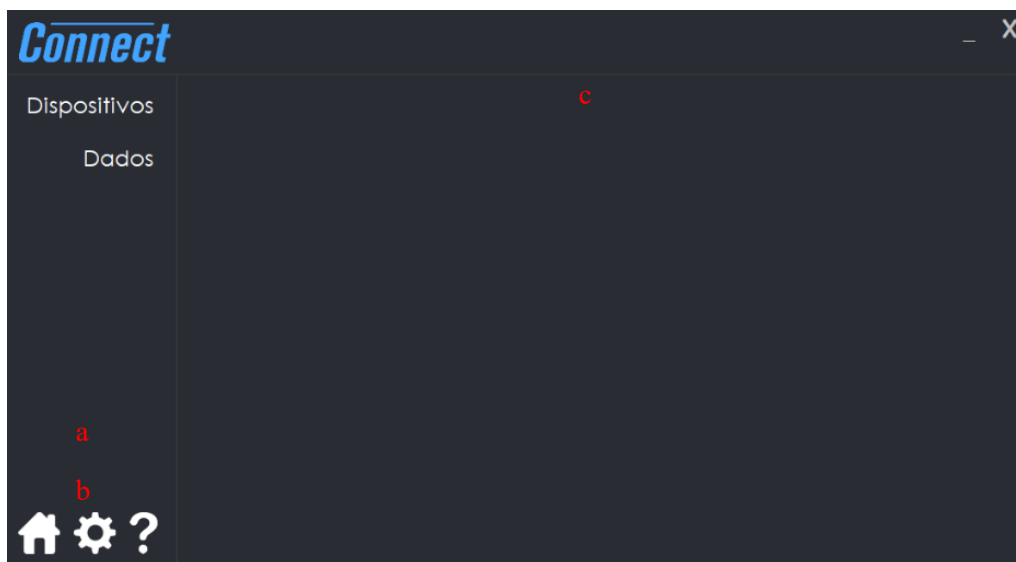


Figura 32 - Tela principal do Connect.

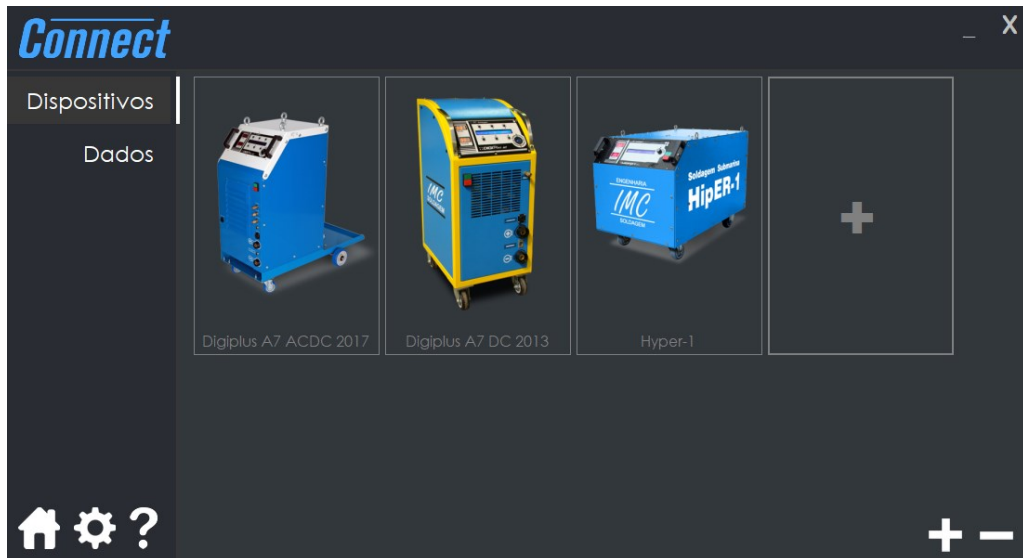


Figura 33 - Tela "Dispositivos" com três fontes cadastradas.

A diferenciação entre dispositivos *on-line* e *off-line* também pode ser vista na tela de adição de dispositivos (Figura 34), onde além de uma tabela com os dispositivos na rede, também são mostrados todos os registros de um banco de dados, podendo-se adicioná-los no modo *off-line*.

Nesta tela, vale se destacar que os dispositivos conectados são os que responderam com um IP válido pelo protocolo UDP com utilização de *sockets*. Inclusive os que receberam um IP pelo DHCP que é iniciado de forma transparente com a aplicação. As informações S/N (Número de série), MAC e IP são as recebidas diretamente no protocolo de estabelecimento de conexão, já o Tipo e Modelo são informações preenchidas com base numa consulta ao banco de dados utilizando-se da parte que representa o modelo do produto do S/N, inclusive a imagem apresentada quando se clica na lista de seleção.



Figura 34 - Tela para adição de dispositivos.

Ao se clicar em algum dispositivo da tela “Dispositivos” será apresentada uma nova janela (Figura 35) com três submenus: Informações, Dados e Acesso Remoto. O primeiro mostra informações da fonte e algumas outras que o próprio usuário pode alterar (como localização do equipamento na planta, data de aquisição e anotações), o segundo apresenta os dados coletados por esse dispositivo especificamente, e o último submenu controla o dispositivo e exibe informações de aquisição (Figura 36).

A tela Acesso Remoto é composta por três grupos principais, sendo o primeiro “comando” que é composto por botões que acionam elementos físicos, como o teste de gás, avanço de arame, e o próprio disparo do processo de soldagem. Também há o grupo “processo” para se definir os parâmetros dos processos, onde ao se selecionar o processo desejado (exibidos de acordo com o modelo da fonte) serão apresentadas somente as variáveis concernentes ao processo. Por último, é possível ativar o gráfico de aquisição em tempo real, escolhendo-se as grandezas para aquisição, e se desejado, pode-se exibir uma tela com detalhes da aquisição, salvá-la e/ou exportá-la diretamente para um arquivo de planilhas. A tela de detalhes, possui informações como valor médio, pode-se definir filtro e regras que indicam desempenho do processo, além de melhor visualização dos dados.

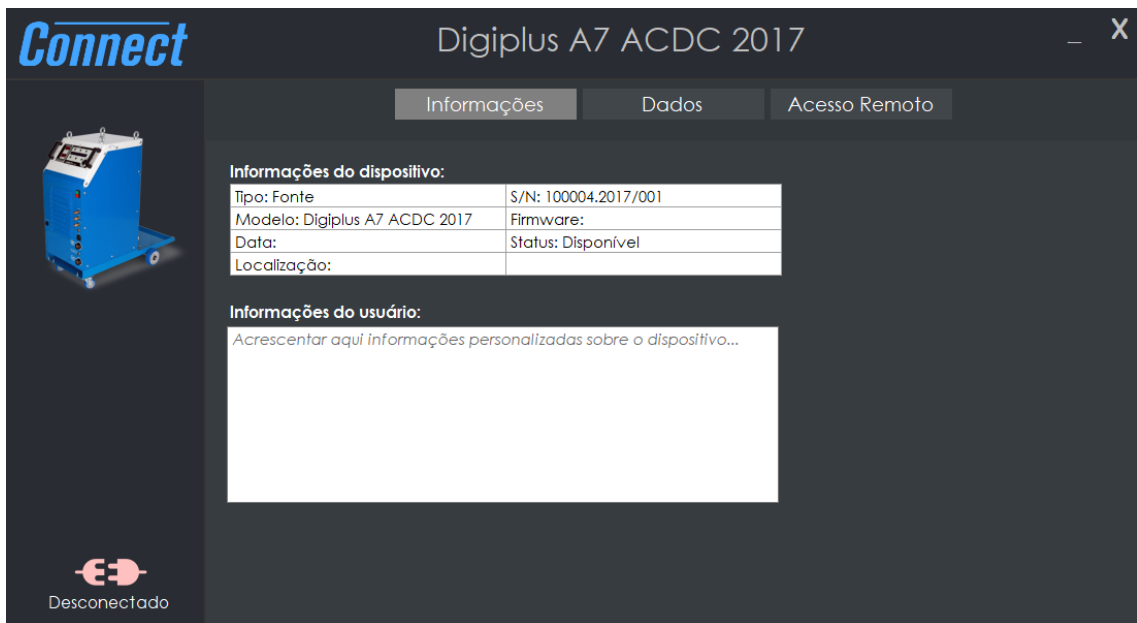


Figura 35 - Tela em uma nova janela com as informações do dispositivo selecionado.

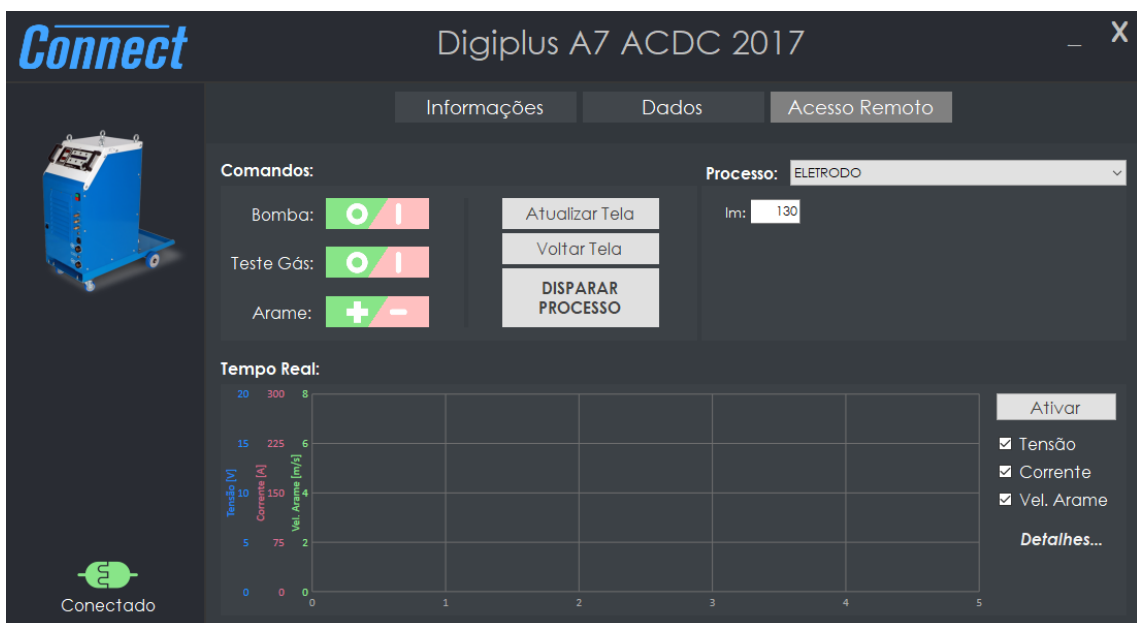


Figura 36 - Submenu "Acesso Remoto".

Os tempos de resposta e capacidade de comunicação das ações da tela “Acesso Remoto” dependem muito da arquitetura de rede utilizada, considerando distância física, número de dispositivos e roteadores entre os comunicantes. Este fator influencia diretamente na qualidade da aquisição realizada.

4.3.2 Banco de dados

O uso de banco de dados no software Connect surgiu pela perspectiva de compartilhamento das informações com vários usuários de forma centralizada, que de fato é um dos pilares da Indústria 4.0 (Big Data), e na intenção de facilitar a migração para uma solução mais robusta ao se integrar em sistemas de informação presente em grandes plantas.

Existem diversas tecnologias de banco de dados e cada uma possui alguma vantagem ou desvantagem em relação as demais. Atualmente os mais utilizados são os modelos relacionais como Oracle, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, etc. [62]. Além desses, destaca-se o SQLite que também possui uma representatividade de uso bastante elevada, considerando a sua proposta *open source* e gratuita. Existem também os modelos não-relacionais que estão cada vez mais presentes como o crescimento da Internet das Coisas (também parte da Indústria 4.0).

Para a escolha da tecnologia do banco de dados, foram levados em consideração alguns requisitos. Sendo eles:

- Compatibilidade com os recursos já implementados;
- Facilidade de implementação;
- Facilidade de migração para outras tecnologias;
- Custo.

Com esses requisitos, optou-se pela utilização do SQLite que além de atender os requisitos citados, também possui a característica de ser *serverless*, ou seja, o banco de dados acompanha a aplicação na forma de um único arquivo. Apesar desta característica não ser a encontrada em soluções mais robustas para indústria, para o desenvolvimento do projeto, a agilidade e facilidade em manutenção e controle do banco permitiu maiores usos do mesmo. Esta característica também não se torna um empecilho já que na implementação do banco todo projeto foi construído considerando-se uma migração, que é bastante simples tendo em vista a proximidade o uso da linguagem SQL compartilhada por vários outros bancos de dados.

No projeto, foram criadas 3 tabelas (Figura 37) com dados empíricos com informações de cadastro de fontes de soldagem (número de série, modelo, foto, processos, ...), parâmetros de processo e aquisições. Para cadastro e identificação do modelo da fonte na tela de “Dispositivos” a tabela de fontes é consultada e apresenta para o usuário todos os valores do

banco de dados. O mesmo acontece quando se acessa a tela de “Acesso Remoto” onde é apresentado somente os processos que aquele modelo de fonte tem disponível e os campos de parâmetros para cada processo especificamente.

fontes_de_soldagem	parametros_de_processo	aquisicoes
<ul style="list-style-type: none"> - ID - nome - número_de_série - modelo - capacidade_corrente - capacidade_polaridade - foto - processos 	<ul style="list-style-type: none"> - ID - processo - corrente_media - tensao_media - parametros_avançados 	<ul style="list-style-type: none"> - ID - data - tempo - corrente - tensao

Figura 37 - Tabelas do banco de dados

As aquisições realizadas pela fonte, comandadas pelo supervisor, além de possíveis de serem exportadas para análise, também podem ser salvas no banco de dados criando indicadores de rastreamento do processo. Como mencionado, estes dados são parte da Indústria 4.0 que por meio deles pode analisar, virtualizar, prever e atuar em processos avançados de soldagem e de produção.

4.4 INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES COM SISTEMA WIFI

Apesar da tecnologia WiFi (802.11) não ter sido inicialmente incluída no escopo desse trabalho, sistemas de comunicação são amplamente requeridos em diversas aplicações e projetos do LABSOLDA, e nesse contexto foi realizado alguns ensaios com essa tecnologia para estudo de viabilidade de aplicação no projeto junto a PETROBRAS denominado: “Desenvolvimento de um sistema automatizado para soldagem circunferencial interna em tubos de aço cladeado com liga 625”. Esses resultados são apresentados aqui no sentido de complementar e atender um dos objetivos do trabalho de analisar redes sem fio aplicadas na soldagem.

O projeto além das competências em processo de soldagem, também engloba o desenvolvimento de um cabeçote de soldagem interna que tem como requisito realizar a união de tubos de 152,4 mm (6 polegadas) de diâmetro e 12 metros de comprimento. Para tanto, devido a impossibilidade de acompanhamento próximo do operador à junta de soldagem se estuda a necessidade do uso de sensores de visão e LASER para acompanhamento da soldagem. Esses sensores são dispostos posteriormente a junta de soldagem em relação a entrada do tubo

(Figura 38), e por tanto, a passagem de cabos pela junta implica em vários desafios. Um deles, por exemplo, é o fato de o cabeçote rotacionar em seu próprio eixo, o que poderia ocasionar uma torção excessiva dos cabos de comunicação.

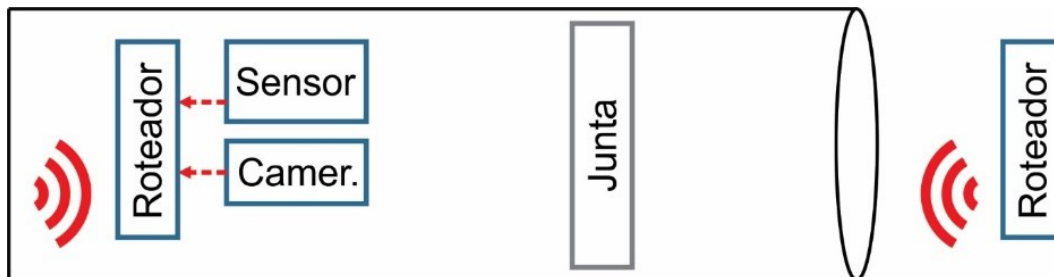


Figura 38 - Disposição dos componentes na união de tubos

Uma das concepções do projeto é estabelecer a comunicação entre os sensores e o controlador/IHM, disposto na extremidade aberta do tubo, por meio do protocolo WiFi (802.11). Nesse sentido, levantou-se os protocolos e requisitos de cada um dos sensores e posteriormente foi realizado alguns ensaios do sistema.

A câmera utilizada é o modelo Xiris XVC-1000 que utiliza nativamente o protocolo de comunicação Giga Ethernet (802.3z), assim como o sensor LASER MetaVision SLS-050 V1.

Normalmente, os sensores citados são ligados diretamente a um computador na placa de rede e o sistema operacional é configurado para utilizar um IP fixo compatível com o do sensor. O primeiro teste realizado, foi o de verificar a viabilidade de utilização de um roteador entre o computador e os dois sensores ainda com a utilização de cabos. Num primeiro momento, se identificou que após alguns ajustes de configuração dos IP's, desativação do DHCP do roteador e desativação do NAT, foi possível se comunicar e receber os sinais dos sensores.

No segundo ensaio, ainda em bancada, foram utilizados dois roteadores TP Link, um do modelo Archer C7 e o outro do modelo N750, ambos com portas gigabit para rede cabeada, e padrão 802.11ac para wireless, utilizando frequência de 5GHz e alcançando teóricos 1300 Mb/s e 450 Mb/s, respectivamente.

Novamente, após as configurações nos parâmetros dos roteadores, como IP, NAT, seleção de banda e frequência, foi possível estabelecer a comunicação entre os dispositivos. Porém, ao se tentar utilizar os sensores de forma simultânea, notou-se que a câmera perdia a conexão com o PC. Após algumas investigações, atribui-se essa falha pela largura de banda menor ao se utilizar o wireless. Essa conclusão surgiu do fato de que ao se alterar os parâmetros de filmagem para resoluções menores e taxa de aquisição também mais baixa, ou seja,

diminuindo consideravelmente a quantidade de informações para transmissão, a conexão entre os dispositivos permanecia estável. O sensor LASER não demonstrou perda de informações com a nova arquitetura.

Apesar de a qualidade ter sido reduzida para 150x120 @ 20 fps frente aos 1280x1024 @ 55 fps suportados pela câmera, ainda era possível ao usuário reconhecer de forma satisfatória os elementos da imagem, e por tanto, todo o sistema foi submetido a ensaios numa bancada com soldagem de fato.

Para simular as condições do projeto, um tubo de 203 mm (8 polegadas) de diâmetro teve uma das extremidades fechadas com uma chapa de mesma espessura do tubo, com exceção de uma pequena passagem para os cabos de alimentação dos sensores e roteador que ficaram no interior do tubo próximo a esta tampa (Figura 39). A intenção ao se fechar uma das extremidades do tubo, era de impedir que as ondas usadas pelo Wifi percorressem outro caminho senão o de atravessar o arco elétrico. O segundo roteador e o computador foram dispostos em frente ao tubo.

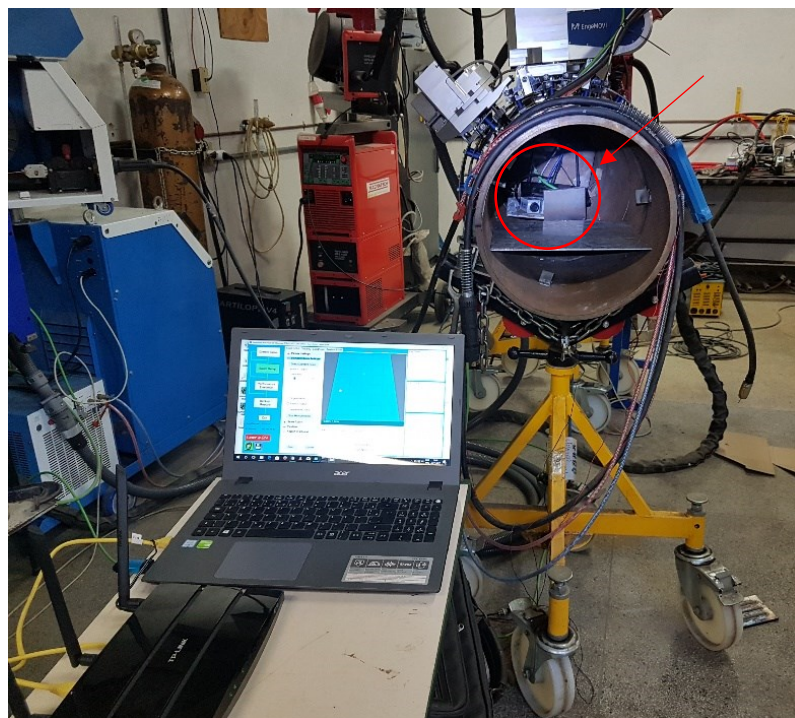


Figura 39 - Ensaio com soldagem e comunicação Wifi

Tendo sido instalados e configurados todos os sensores e os parâmetros de comunicação, foi selecionado o processo de soldagem MIG Convencional para os ensaios, com corrente média de 130A e 350A. Este processo foi escolhido devido as características de tensão e corrente que

variam bastante ao longo da soldagem ocasionadas pelo curto circuito e que geram ruídos no meio de comunicação. Os cordões de solda, foram realizados por um operador manual na extremidade do tubo em chapas de teste localizadas dentro do mesmo, simulando as condições do projeto.

Nos ensaios, verificou-se que em nenhum momento houveram perdas de pacotes ou desconexões por parte dos sensores. Estes resultados permitiram a continuidade desta concepção para o projeto e inclusive se considera uma seleção melhor dimensionada dos componentes de rede e dos próprios sensores para melhor adequação aos requisitos do projeto, principalmente o dimensional, já que o tubo de referência do projeto possui apenas 152,4 mm (6 polegadas).

4.5 OUTROS RESULTADOS

Com a inserção deste trabalho no projeto SISASOLDA ao qual a empresa IMC Soldagem é interveniente, foi possível transferir tecnologias desenvolvidas durante a dissertação a projetos próprios da empresa, implantados inclusive em plantas industriais.

4.5.1 Sistema de Nitretação por PLASMA

A IMC Soldagem além de fontes de soldagem, sistema de aquisição de dados portátil, entre outros, também desenvolve projetos especiais. Um destes projetos, em andamento durante o período deste trabalho, era um sistema de nitretação por PLASMA (Figura 40). Este sistema necessitava controlar, comandar e registrar vários sinais. Cita-se os principais:

- Controlar temperatura em três regiões da parte interna da câmara de Plasma por meio da leitura de seis termopares;
- Controlar temperatura nas três regiões externa acionando conjuntos de resistências;
- Acionar ventiladores e janelas de cada região;
- Controlar corrente e tensão de Plasma;
- Monitorar curto circuitos do Plasma;
- Comandar seis gases de plasma através de válvulas mássicas;
- Ler valores de pressão;
- Comandar bomba de vácuo;

- Acionar elevador para suspender câmara de Plasma;
- Registrar todos os sinais durante a operação;

Para isso, a IMC estava buscando um processador com vários recursos de I/O digital e analógico, que fosse robusto, tivesse uma plataforma de desenvolvimento amigável, com disponibilidade de informações, entre outros aspectos pertinentes a implementação de sistemas embarcados. Esta busca acabou sendo suprida com a transferência de tecnologias referente ao módulo de processamento baseado no microcontrolador STM32F4 Discovery, adotado após análise no presente trabalho.

Todo o sistema passou por diversos testes, inclusive o de estabilidade do sistema, o qual deixou o equipamento ligado e com os sinais monitorados por dias, requisitando-se dados pela comunicação serial e avaliando-se a perda de sinais ou pacotes de informações.

Atualmente o sistema opera 24 horas por dia, com operações de nitretação que podem durar mais de 15 horas.



Figura 40 – Sistema de Nitretação por PLASMA

4.5.2 Sistema de Rastreabilidade do Processo de Soldagem

Durante o período do trabalho, a IMC iniciou o desenvolvimento de um outro projeto especial, que se tratou de um sistema de rastreabilidade do processo de soldagem em linha de montagem. Assim como o Sistema de Nitretação, este sistema fez uso de avanços deste trabalho, também pela utilização do microcontrolador STM32F4-Discovery, mas neste caso voltado aos recursos de comunicação com a Ethernet em substituição a USB que vinha sendo usada em sistemas de monitoramento já produzidos pela referida empresa.

O sistema é dedicado para aquisição de sinais de soldagem utilizando sensores e conversores próprios para adquirir as grandezas de soldagem, com uma IHM composta por PC e tela *touch* (Figura 41). Neste sistema o STM32F4 Discovery tem a função de capturar os dados da unidade de tratamento de sinais e enviá-los ao PC através da Ethernet. A vantagem em relação a USB é o isolamento do meio físico proporcionado pela Ethernet em relação a USB padrão e principalmente por garantir a entrega dos dados, devido a protocolos sofisticados, e ainda, não travar a comunicação na presença de ruídos, que ocorrem com frequência com o uso da USB em modo Isochronous.

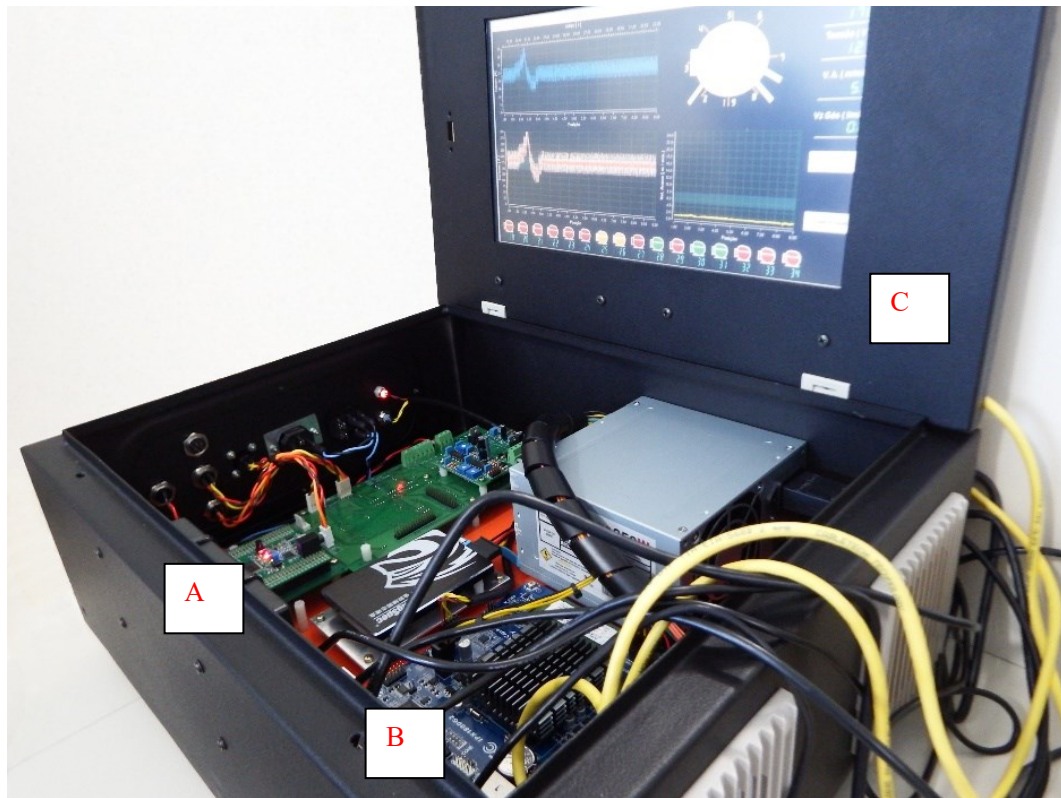


Figura 41 - Sistema de Rastreabilidade do Processo de Soldagem. a) Microcontrolador utilizado neste trabalho com o protocolo Ethernet e pilha LwIP implementada. b) PC industrial comunicando via Ethernet com o microcontrolador. c) IHM *touchscreen*.

5 CONCLUSÕES

O cenário tecnológico atual (4ª Revolução Industrial), dentro do setor em que o trabalho se insere (Soldagem e sua Automação), apresenta características cada vez mais crescentes de interdisciplinaridade, assim como expansão do espectro e sofisticação de ferramentas auxiliares às operações dos players envolvidos (fabricantes de fontes de soldagem, fabricantes de sistemas de automação, fabricantes de consumíveis, fabricantes de periféricos e sensores, usuários industriais da soldagem, pesquisa e desenvolvimento,...). Tais ferramentas buscam apoiar, de maneira integrada a documentação da produção, análise de dados, controle de parâmetros, avaliação de produtividade, interconectividade e acessibilidade a dados armazenados, segurança e confiabilidade das operações.

O grau de integração em que estes sistemas de apoio tradicionalmente operam em uma operação de soldagem é nulo, ou significativamente menor do que a nova tendência da Indústria 4.0 preconiza. O LABSOLDA, dentro de seus projetos e linhas de P,D&I, investiga e desenvolve ferramentas e subsistemas auxiliares para comunicação e supervisão. A nova ordem e velocidade de avanços tecnológicos no setor, no entanto, motivou a dedicação de um trabalho em sua plenitude a aspectos de comunicação e supervisão, no contexto de sistemas de Soldagem.

Sendo, assim, o presente trabalho estabeleceu as primeiras metodologias específicas e aprofundou a sistematização da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de comunicação e supervisão aplicadas a processos de soldagem. Esta base permitiu a formação de know-how e aparelhamento para devida abordagem destas questões em futuros projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Elencam-se também, conclusões técnicas específicas:

- A utilização do protocolo Ethernet em conjunto a pilha lwIP se mostrou promissora mesmo em ambientes de soldagem, considerando que aplicação não será de controle do processo de soldagem em si, devido principalmente pelos tempos de resposta e eventuais atrasos nas mensagens.
- O ambiente de soldagem, apesar de considerado hostil, não se mostrou tão prejudicial aos sistemas de comunicação, podendo-se concluir que a tendência de adoção de protocolos consagrados em ambientes não industriais, como a Ethernet, ZigBee, Bluetooth e WiFi, etc. continuará em alta.

- O microcontrolador STM32F4-Discovery se mostrou compatível com os sistemas já existentes tanto nas fontes de soldagem avaliadas como nos manipuladores, sendo considerado como uma boa escolha para evolução dos equipamentos avaliados.
- O módulo de rede utilizado apesar de funcionar adequadamente tanto com o microcontrolador e com as bibliotecas utilizadas, é necessária uma modificação em hardware, devido ao fabricante não incluir no projeto e fabricação a conexão entre os pinos de saída e o CI de rede, para que seja possível o reconhecimento e consequente tratamento em software quando acontece uma conexão/desconexão de um cabo de rede no sistema.
- Os equipamentos avaliados neste trabalho se mostraram aptos, ainda que sem a atualização para o novo microcontrolador, a operarem em conjunto a um sistema de supervisão e controle desenvolvido neste trabalho em ambiente Windows e com suporte a novas tecnologias de programação, interface com o usuário e banco de dados.
- O Zigbee se mostrou promissor em aplicações que não requisitam sinais de controle. Os tempos de resposta baixos, na ordem de 20 a 100 ms, tanto no modo de conexão direta entre módulos (*transparente mode*) como no modo de rede em malha, além do baixo consumo de energia, propicia evoluções em sistemas de soldagem com a possibilidade de diminuição de comunicações cabeadas.
- Os desenvolvimentos e avaliações nas avaliações dos sistemas empregados no trabalho acerca de programação de *firmwares* e bibliotecas, geraram subsídios para o andamento de outros projetos relacionados do LABSOLDA e também dos parceiros do projeto.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

As conclusões justificam a continuidade dos trabalhos a tendo em vista o promissor emprego das tecnologias aqui avaliadas e da decorrente revolução industrial. Seguem:

- Pesquisa e desenvolvimento acerca de viabilidade de utilização de protocolos industriais abertos, como ModBus TCP, Ethernet IP ou DeviceNet, verificando a real problemática e dificuldade de integração com esses protocolos.
- Com a Indústria 4.0 e o Big Data, novos desenvolvimentos nas áreas de inteligência artificial (IA) estão se fazendo mais presentes na análise de dados e predição de comportamentos que podem vir a ser aplicados em aquisições de soldagem e

desenvolvimento de supervisórios mais inteligentes. Portanto, sugere-se também como trabalho futuro o estudo de IA aplicada a soldagem avaliando a usabilidade das informações coletadas atualmente.

- Os desenvolvimentos em software estão atualmente mais voltados a operação multiplataforma e não somente a exclusividade de execução em ambiente Windows. Recomenda-se novos desenvolvimentos para o sistema de supervisão e controle em dispositivos móveis.
- O emprego de RTOS (*Real Time Operation Systems*) em sistemas embarcados tem aparecido como solução para diversos sistemas de controle, com restrições temporais, recomenda-se a avaliação do mesmo no microcontrolador STM32F4-Discovery que, segundo o fabricante, suporta essa funcionalidade.

REFERÊNCIAS

- [1] RIPPEY, W.G. **Network communications for weld cell integration – status of standards development**. In: 13th International Conference on Computer Technology in Welding, 2003, Orlando, Florida, USA, 2003.
- [2] ROMANO, V. F. **Robótica Industrial Aplicada na Indústria de Manufatura e Processos**. Edgard Blucher Ltda.; 2002.
- [3] LABSOLDA. **Sistema Avançado de Soldagem para o Setor de Petróleo e Gás com Ênfase em Estruturas de Alumínio (SISASOLDA)**. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/sisasolda-sistema_avancado_de_soldagem.php> Acesso em: 12/06/2016
- [4] ROSER, M.; RITCHIE, H. **Technological Progress**. Our World in Data. 2017. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/technological-progress/>> Acesso em: 30/10/2017.
- [5] KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group**. ACATECH. 2013. Disponível em: <http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf> Acesso em: 02/10/2017.
- [6] EWING, J.; SCOTT, M. **German Automakers Step Up to Silicon Valley Challenge**. The New York Times. 2017. <<https://www.nytimes.com/2017/02/08/business/germany-bmw-daimler-volkswagen-uber.html>> Acesso em: 04/09/2017.
- [7] HERMANN, M; PENTEK, T; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. Technische Universität Dortmund. 2015. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review> Acesso em: 17/10/2017.

- [8] GILCHRIST, A. **Industry 4.0: The Industrial Internet of Things**. Bangken, Thailand: **Apress**, 2016. 256 p. <<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>>.
- [9] SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. **First-Class Result For The 19th Schweissen & Schneiden**. 2017. Disponível em: <<https://www.schweissen-schneiden.com/press/press-texts/detail-sus/first-class-result-for-the-19th-schweissen-and-schneiden-outstanding-business-at-the-fair-and-top-quality-international-public-at-the-successful-leading-global-fair-2411>> Acesso em 01/11/2017.
- [10] SILVA, R. H. G. **Review Feira**. Florianópolis – SC. 2017. Relatório interno.
- [11] MISTODIE, L.; JONI, N. **Artificial Intelligence In Welding Processes**. The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati Fascicle XII, Welding Equipment and Technology. 2009.
- [12] KEMPPPI. **User Documents**. Disponível em: <https://userdoc.kemppi.com/en/mig-mag/x8/control-pad/topics/control_pad_tech_specs.html> Acesso em: 01/10/2017
- [13] FRONIUS. **WeldConnect**. Disponível em: <<http://www.fronius.com/en/welding-technology/products/digital-products/digital-products/weldconnect/weldconnect>> Acesso em: 31/10/2017.
- [14] EWM AG. Catalogue Automation 2017. Disponível em: <<https://www.ewm-group.com/downloads/262564/WM108301.PDF>> Acesso em: 13/11/2017
- [15] STEMMER, M. R. **Redes Locais Industriais – A Integração da Produção Através das Redes de Comunicação**. Florianópolis, Editora UFSC; 2010.

- [16] TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. **Redes de Computadores**. 4ª Ed., Editora Campus (Elsevier), 2003.
- [17] California State University Dominguez Hills. **Analogy between the postal network and TCP/IP**. Disponível em:
<<http://bpastudio.csudh.edu/FAC/lpress/471/hout/netech/postofficelayers.htm>> Acesso em: 22/03/2018.
- [18] FALL, K. R.; STEVENS, W. R. **TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols**. 2ª Edição. Michigan, Estados Unidos. Addison-Wesley. 2011.
- [19] ST. **UM1472 User manual**. Disponível em:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf> Acesso em: 15/06/2016.
- [20] LIGHTWEIGHT TCP/IP STACK. Disponível em:
<<http://savannah.nongnu.org/projects/lwip>> Acesso em: 14/06/2016.
- [21] PLOEG, L. V. **SMALL TCP/IP STACKS FOR MICRO CONTROLLERS**. 2014.
- [22] LINCOLN ELECTRIC. **Digital Communications Technology**. Disponível em
<<http://www.lincolnelectric.com/en-us/industries/documents/nx120.pdf>> Acesso em: 03/03/2018.
- [23] ODVA. **DeviceNet Overview**. Disponível em <<https://www.odva.org/Technology-Standards/DeviceNet-Technology/Overview>> Acesso em: 12/03/2018.
- [24] ODVA. **ControlNet Overview**. Disponível em <<https://www.odva.org/Technology-Standards/ControlNet/Overview>> Acesso em: 12/03/2018.
- [25] ODVA. **Ethernet/IP Overview**. Disponível em <<https://www.odva.org/Technology-Standards/EtherNet-IP/Overview>> Acesso em: 12/03/2018.

- [26] LUGLI, A. B. **Uma Visão do Protocolo Industrial Profinet e suas Aplicações**. PI Brasil. Disponível em: <http://www.profibus.org.br/artigos_tecnicos/uma-visao-do-protocolo-industrial-profinet-e-suas-aplicacoes> Acesso em: 12/03/2018.
- [27] TRIGGS, R. **WiFi standards explained: what you should know about the new 802.11 ad, ah & af standards**. Android Authority. 2016. Disponível em: <<https://www.androidauthority.com/wifi-standards-explained-802-11b-g-n-ac-ad-ah-af-666245/>> Acesso em: 11/01/2018.
- [28] MOTA, C. P. **Sistema Guiado Sem Fio para Soldagem Mecanizada Supervisionada com Uso de Iluminação por Infravermelho Próximo**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 24. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia).
- [29] MACHADO, M. V. R.; MOTA, C. P.; FINZI NETO, R. M.; VILARINHO, L. O. **Sistema embarcado para monitoramento sem fio de sinais em soldagem a arco elétrico com abordagem tecnológica**. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 17, n. 2, Abr/Jun 2012.
- [30] BLUETOOTH SIG. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/about-us>> Acesso em 11/01/2018.
- [31] SIMS, G. **What is Bluetooth 5 – Gary explains**. Android Authority. 2016. Disponível em: <<https://www.androidauthority.com/bluetooth-5-gary-explains-703734/>> Acesso em: 11/01/2018.
- [32] EE Times. **ZigBee: Wireless Technology for Low-Power Sensor Networks**. Disponível em: <http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1275760> Acesso em: 27/07/2016.
- [33] ZIGBEE ALLIANCE. Utility Industry. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/what-is-zigbee/utility-industry/>> Acesso em: 27/07/2016.

- [34] HILDENBRAND, J. **What are Zigbee and Z-Wave? Everything you need to know!**. Android Central. 2017. Disponível em: <<https://www.androidcentral.com/what-zigbee-and-zwave>> Acesso em 03/11/2017.
- [35] MALHI, K. et al. **A Zigbee-Based Wearable Physiological Parameters Monitoring System**. IEEE Sensors Journal, Vol. 12, nº. 3, março/2012.
- [36] FERREIRA, A. G. et al. **A Smart Wearable System for Sudden Infant Death Syndrome Monitoring**. IEEE Sensors Journal, maio/2016.
- [37] PANTELOPOULOS, A.; BOURBAKIS, N. G. **A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis**. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part C (Applications Rev.), vol. 40, no. 1, pp. 1-12, 2010.
- [38] LINCOLN ELECTRIC. **Inverter Based Power Sources for Welding Aluminum**. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-based-power-detail.aspx>> Acesso em: 10/12/2017.
- [39] GOHR JR., R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 47. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia).
- [40] GUIZZO, E. **The Rise of Machines**. IEEE Spectrum. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-rise-of-the-machines>> Acesso em: 21/12/2017.
- [41] ABB Robotics. Vídeo **ABB Robotics - 10 most popular applications for robots**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fH4VwTgfyRQ>>. Acesso em: 21/12/2017.
- [42] ROBOT WELDING. **Statistics**. Disponível em: <<http://www.robotwelding.co.uk/statistics.html>> Acesso em: 21/12/2017.

- [43] MONTAQIM, A. Robotics and Automation News. **Top 14 industrial robot companies and how many robots they have around the world.** 2015. Disponível em: <<http://roboticsandautomationnews.com/2015/07/21/top-8-industrial-robot-companies-and-how-many-robots-they-have-around-the-world/812/>> Acesso em: 27/12/2017.
- [44] MOTOMAN. **Motoman NX100 Controller - ComArc Instruction Manual.** Disponível em: <<https://www.motoman.com/hubfs/downloads/documentation/150602-1.pdf>> Acesso em 27/12/2017
- [45] MOTOMAN. **Dx100 Options Instructions For Laser-Tracking Function: Motoeye-LT.** Disponível em: <<https://www.motoman.com/hubfs/downloads/documentation/164276-1CD.pdf>> Acesso em 27/12/2017
- [46] GOHR JR., R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 119. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia).
- [47] STEINBACH, R.; DIAS, R. A.; TEICHMANN, E. W. **Plataforma Integrada Para Rastreamento De Parâmetros De Soldagem A Arco Voltaico – Raster.** Revista Ilha Digital. Volume 4. 2013.
- [48] MITCHELL, B. **What Are Ethernet Crossover Cables?** Lifewire. 2017. Disponível em: <<https://www.lifewire.com/crossover-cable-ethernet-817870>> Acesso em: 24/01/2018.
- [49] TEXAS INSTRUMENTS. **DP83848-EP Data Manual.** 2012. Disponível em <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dp83848-ep.pdf>> Acesso em: 24/02/2018.
- [50] IMC-SOLDAGEM. Fonte de Soldagem DIGIPlus A7. **Manual de Instruções.** Disponível em: <http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual_Digiplus_2aEd.pdf> Acesso em: 21/07/2016.

- [51] SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM - SPS. Disponível em:
<www.spssoldagem.com.br/tartilope_v4.php> Acesso em: 21/07/2016.
- [52] SAMEK, M. **Cutting Through the Confusion with ARM Cortex-M Interrupt Priorities**. Embedded Gurus. 2014. Disponível em: <<https://embeddedgurus.com/state-space/2014/02/cutting-through-the-confusion-with-arm-cortex-m-interrupt-priorities/>> Acesso em: 27/07/2017.
- [53] WAVE SHARE. **DP83848 Ethernet Board Schematic**. 2016. Disponível em:
<<https://www.waveshare.com/w/upload/3/31/DP83848-Ethernet-Board-Schematic.pdf>>
Acesso em: 28/09/2017.
- [54] IMC-SOLDAGEM. **Comunicação com a Digiplus A7 Impressão**. Florianópolis - SC. 2017. Relatório Interno.
- [55] ATMEL. **AT11412: UART to Ethernet Gateway with SAM4S**. Disponível em:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-42429-UART-to-Ethernet-Gateway-with-SAM4S-AT11412_Application-Note.pdf> Acesso em: 21/01/2018
- [56] MAJERLE, T. STM32 tutorial: **Efficiently receive UART data using DMA**. 2017. Disponível em: <<https://stm32f4-discovery.net/2017/07/stm32-tutorial-efficiently-receive-uart-data-using-dma/>> Acesso em: 22/01/2018.
- [57] LINCOLN ELETRIC. **Power Wave Software Solutions Technology - Tools That Enable Smart Business Decisions**. Disponível em:
<<http://www.lincolnelectric.com/Assets/US/EN/literature/S250.pdf>> Acesso em: 05/08/2017.
- [58] MILLER WELDS. **Insight Welding Intelligence**. Disponível em:
<<https://www.millerwelds.com/products/insight>> Acesso em: 05/08/2017.

- [59]FRONIUS INTERNATIONAL. **FRONIUS EXPLORER - Operating Instructions.**
Disponível em: <http://www.pronius.fi/uploads/Kayttohje_FroniusExplorer_ENG.pdf>
Acesso em: 05/08/2017.
- [60]PANDHI, D. Nukeation Studios. **How to Create the Best User Experience for Your Application.** 2006. Disponível em: <<https://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa468595.aspx>> Acesso em: 06/08/2017.
- [61]HEATH, M. **10 Ways to Create Maintainable and Testable Windows Forms Applications.** 2014. Disponível em: <<http://markheath.net/post/maintainable-winforms>>
Acesso em 06/08/2017.
- [62]DB-ENGINES. **DB-Engines Ranking.** Disponível em: <<https://db-engines.com/en/ranking>> Acesso em 28/02/2018.