

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA A UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA *WIRELESS* NO
MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE MOTORES EM USINAS
NUCLEARES

Olivio da Conceição Napolitano

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Nuclear, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Nuclear.

Orientador: Roberto Schirru

Rio de Janeiro
Março de 2019

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA A UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA *WIRELESS* NO
MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE MOTORES EM USINAS
NUCLEARES

Olivio da Conceição Napolitano

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

Prof. Alan Miranda Monteiro de Lima, D.Sc.

Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2019

Napolitano, Olivio da Conceição

Estudo de Viabilidade para a Utilização da Tecnologia *Wireless* no Monitoramento de Condições Operacionais de Motores em Usinas Nucleares / Olivio da Conceição Napolitano. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 94 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Roberto Schirru

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 90-94.

1. Tecnologia *Wireless*. 2. Condições Operacionais de Motores. 3. Monitoramento em Usinas Nucleares. I. Schirru, Roberto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, grande batalhador, por permitir toda a minha formação escolar, e a minha mãe (in memoriam), que moldou a minha educação e caráter para enfrentar os desafios da vida.

À minha esposa Guida, que me apoia emocionalmente e fisicamente para manter o foco nas metas traçadas. Aos meus filhos, Bruno e Guilherme, que me motivam a conseguir os meus projetos. Além dos meus netos, Marina e Tomás, que dão o colorido necessário para diminuir o estresse e a preocupação em completar o curso de Mestrado.

Aos meus amigos do curso de Mestrado e da empresa Eletronuclear, em especial Renato Koga e Bruno Pinho, que me incentivaram desde o início do curso, dividindo comigo os seus conhecimentos alcançados anteriormente. Sem eles, seria tudo bem mais difícil.

Ao meu cardiologista Dr. Marcelo Fabrício que me incentivou a iniciar e continuar o curso de Mestrado como a melhor terapia para o meu cérebro, garantindo que o meu coração suportaria a pressão e desafio de voltar aos bancos da universidade após 37 anos de formado em Engenharia Eletrônica na UFRJ (dezembro de 1978).

Ao professor doutor Paulo Victor Carvalho e engenheiro Marcos Santana, do Instituto de Energia Nuclear – IEN, que propiciaram a visitação e realização de teste básico de interferência eletromagnética, por sinal de WI-FI, em projetos realizados no reator de pesquisa ARGONAUTA.

Ao professor doutor H. M. Hashemian, presidente da empresa Analysis and Measurement Services Corporation (AMS - EUA), especialista em aplicações de Instrumentação e Controle em Usinas Nucleares, que gentilmente autorizou a utilização de artigos técnicos seus e de sua empresa neste trabalho.

A todos os amigos do Laboratório de Monitoração de Processos (LMP) pelo incentivo e companheirismo, além das dicas técnicas, em especial ao Norberto Bellas, responsável pela minha vinda a COPPE, professora Andressa Nicolau e professor Alan Miranda. Também ao professor Claudio Pereira do IEN.

Ao meu orientador, professor doutor Roberto Schirru, que acreditou no meu potencial desde o início do curso, me motivando e orientando este trabalho para uma visão acadêmica e uma possível continuidade para utilização na pesquisa e aplicação na Central Nuclear de Angra.

Aos Professores do Programa de Engenharia Nuclear pela excelência nas disciplinas ministradas do programa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DE VIABILIDADE PARA A UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA *WIRELESS* NO
MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE MOTORES DE USINAS
NUCLEARES

Olívio da Conceição Napolitano

Março / 2019

Orientador: Roberto Schirru

Programa: Engenharia Nuclear

Atualmente, mais de 2/3 de usinas nucleares de potência do mundo tem mais de 30 anos de vida e a maioria dos motores instalados nessas usinas nucleares não possuem monitoração *online* e em tempo real, sendo realizada manualmente por ronda e por frequência periódica (mensal, trimestral etc.). Em alguns casos, determinados motores são diretamente responsáveis por paradas forçadas de manutenção e por perdas de geração, que podem ultrapassar R\$ 3 milhões por dia. Adicionalmente, a implantação de uma monitoração com fio (a cabo) nas usinas mais antigas é onerosa e trabalhosa, sendo que a instalação de um cabeamento de grau nuclear pode custar até US\$ 2.000,00 por 30 centímetros, de acordo com o levantamento do EPRI. Dessa forma, a tecnologia *wireless* se mostra uma ferramenta poderosa como opção para monitoramento das condições operacionais de equipamentos, principalmente vibração e temperatura de grandes motores, de forma a diminuir custos de manutenção, melhorar as tomadas de decisões gerenciais e, conseqüentemente, minimizar as paradas forçadas por falhas inesperadas de ativos das usinas nucleares. Adicionalmente, pode reduzir a dose de radiação dos trabalhadores das usinas nucleares e facilitar o monitoramento em áreas de difícil acesso, assim como reduzir custos de instalações (novas e temporárias) de equipamentos e auxiliar no planejamento e execução de tarefas em paradas programadas de manutenção. Para que o uso da tecnologia *wireless* numa usina nuclear seja viável, é necessário eliminar os possíveis riscos de falhas por interferências eletromagnéticas e radiofrequência, por segurança cibernética, pelo ambiente nuclear severo (temperatura, radiação, umidade) etc. A metodologia e estratégia deste trabalho foi realizar uma pesquisa da tecnologia *wireless*, da experiência de seu uso na indústria nuclear com os resultados e os desafios para sua implantação, assim como a possibilidade de sua aplicação nas Usinas Nucleares de Angra. Além disso, o autor realizou testes básicos de operabilidade e de interferências eletromagnéticas em dispositivos *wireless* no Reator de Pesquisa Argonauta (IEN).

Abstract of Dissertation presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FEASIBILITY STUDY FOR THE USE OF WIRELESS TECHNOLOGY TO MONITOR
OPERATIONAL CONDITIONS OF MOTORS IN NUCLEAR POWER PLANT

Olivio da Conceição Napolitano

March / 2019

Advisor: Roberto Schirru

Department: Nuclear Engineering

Currently, more than 2/3 of the world's nuclear power plants are over 30 years old and most of the engines installed in these nuclear plants are not monitored online and in real time, being performed manually by round and by periodic frequency (monthly, quarterly etc.). In some cases, certain motors are directly responsible for forced outages and generation losses, which may exceed R \$ 3 million per day. In addition, the deployment of wired (cable) monitoring in older facilities is costly and labor intensive and installing a nuclear grade cabling can cost up to US \$ 2,000 per 30 centimeters, according to the EPRI survey. Therefore, wireless technology is a powerful tool as an option to monitor the operational conditions of equipment, mainly vibration and temperature of large motors, in order to reduce maintenance costs, improve managerial decision making and, consequently, minimize forced outage by unexpected asset failures of nuclear plants. Additionally, it can reduce the radiation dose of nuclear plant workers and facilitate monitoring in hard-to-reach areas, as well as reduce equipment installation costs (new and temporary) and assist in planning and performing tasks at scheduled maintenance shutdowns. For the use of wireless technology in a nuclear power plant to be feasible, it is necessary to eliminate the possible risks of failure by electromagnetic and radiofrequency interference, by cybernetic security, by the severe nuclear environment (temperature, radiation, humidity), etc. The methodology and strategy of this work was to carry out a survey of the wireless technology, the experience of its use in the nuclear industry with the results and the challenges for its implementation, as well as the possibility of its application in the Angra Nuclear Power Station. In addition, the author performed basic tests of operability and electromagnetic interference on wireless devices in the Argonauta Research Reactor (IEN).

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Contextualização.....	1
1.2.	Objetivo do Estudo.....	4
1.3.	Justificativa e Uso dos Resultados.....	4
1.4.	Estrutura do Trabalho.....	5
2.	DESCRIÇÃO DAS TECNOLOGIAS <i>WIRELESS</i>	6
2.1.	REDES DE DADOS <i>WIRELESS</i>	11
2.1.1	WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK (WPAN).....	12
2.1.2	WIRELESS LOCAL AREA NETWORK (WLAN).....	12
2.1.3	WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK (WMAN).....	12
2.1.4	WIRELESS WIDE AREA NETWORK (WWAN).....	13
2.2	PADRÕES INDUSTRIAIS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO.....	13
2.2.1	PADRÕES IEEE.....	14
2.2.1.1	802.11.....	15
2.2.1.2	802.15.1.....	15
2.2.1.3	802.15.4.....	16
2.2.1.4	802.15.3.....	16
2.2.1.5	802.16.....	17
2.2.1.6	REDES E PROTOCOLOS SEM FIO PARA A INDÚSTRIA DE ENERGIA NUCLEAR.....	17
2.2.2	PADRÃO ISA100.....	17
2.2.3	PADRÃO WirelessHART.....	20
2.3	TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DOS SINAIS DA TECNOLOGIA SEM FIO....	23
2.3.1	FHSS – ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SALTO DE FREQUÊNCIAS	24
2.3.2	DSSS – ESPALHAMENTO ESPECTRAL COM SEQUENCIAMENTO DIRETO.....	25
2.3.3	OFDM – MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA.....	26
2.4	ESTRUTURA DE UMA REDE <i>WIRELESS</i>	27
2.4.1	ANTENAS.....	27
2.4.1.1	TIPOS DE ANTENA DE TRANSMISSÃO.....	28
2.4.1.2	SISTEMAS DE ANTENA DISTRIBUÍDA.....	29
2.5	TOPOLOGIAS DAS REDES <i>WIRELESS</i>	32
2.5.1	PONTO A PONTO.....	32
2.5.2	ESTRELA.....	32

2.5.3	ÁRVORE	33
2.5.4	MALHA (<i>MESH</i>)	33
2.5.5	HÍBRIDAS	34
2.6	SEGURANÇA DE DADOS NA REDE WIRELESS	34
2.6.1	SEGURANÇA CIBERNÉTICA PARA USINAS NUCLEARES	36
2.7	INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS E POR RÁDIO FREQUÊNCIA (EMI / RFI).....	38
2.7.1	EMI / RFI EM USINAS NUCLEARES	39
2.8	Alimentação Elétrica para os Sensores <i>Wireless</i>	46
2.8.1	Alimentação Elétrica de linha.....	47
2.8.2	Alimentação Elétrica por Bateria.....	47
2.8.3	Alimentação Elétrica por <i>Power Harvesting</i> (Energia por “Colheita”) ou Autoalimentada.....	47
2.8.4	Alimentação Elétrica por Transmissão de Energia <i>Wireless</i>	47
3.	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA TECNOLOGIA WIRELESS	47
4.	TECNOLOGIA <i>WIRELESS</i> NO MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE MOTORES EM USINAS NUCLEARES.....	54
4.1.	Monitorização da Vibração de Máquinas Rotativas	55
4.2.	Estudos de caso para monitoração de vibração com uso de tecnologia <i>Wireless</i> :.....	63
	• Evitando falha catastrófica de rolamento pela empresa SKF	63
	• Monitoração de Vibração Torsional do Eixo de Turbo Geradores pelo EPRI	65
5.	APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA TECNOLOGIA <i>WIRELESS</i>	66
5.1.	Testes do Uso da Tecnologia <i>Wireless</i> no Reator de Pesquisa Argonauta – Instituto de Energia Nuclear (IEN).....	69
5.2.	Outros Exemplos de Aplicações da Tecnologia <i>Wireless</i> na Indústria Nuclear e em Usinas Nucleares.....	71
6.	APLICAÇÃO POTENCIAL DA TECNOLOGIA <i>WIRELESS</i> NA CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA.....	82
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
	REFERÊNCIAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Revolução moderna da Indústria 4.0 e IIoT com Conexão e Mobilidade Globalizada a partir da tecnologia *WIRELESS*

Figura 2 - Avanço da tecnologia digital para armazenamento de dados (Advantech, 2013) e Rede de Dados Wireless)

Figura 3 - Moderna Sala de Controle Digital da Usina Chinesa Yangjiang 5 (WNA, 2018)

Figura 4 - Rede Cabeada: Elementos: Switch, Clientes, Cabos

Figura 5 - Rede Sem Fio: Elementos: Switch, Clientes, Access Point, Clientes *wireless*, facilidade para ampliação

Figura 6 – Pontos de Acesso dentro de uma Rede *Wireless* WLAN (EPRI, 2006)

Figura 7 - Taxa de dados versus área operacional para redes e protocolos sem fio (EPRI, 2009).

Figura 8 - Configuração de rede típica usando ISA100.11a (YOKOGAWA, 2015)

Figura 9 - Flexibilidade de uma Rede Wireless ISA100 (ISA, 2014)

Figura 10 - Classificação de aplicações de automação industrial. (ISA-SP 100.11, 2006)

Figura 11: Dispositivo WirelessHART que fornece informações de diagnóstico adicionais

Figura 12 - Montagem típica de uma Emerson Smart Wireless (Emerson, 2019)

Figura 13 - Comparação entre os protocolos proprietários e da norma IEEE (EPRI, 2018)

Figura 14 - *Frequency Hopping Spread Spectrum* – FHSS típico do WirelessHart [13]

Figura 15 - Sobreposição de canais para protocolos de rede wireless de 2.4 GHz (AMS, 2012)

Figura 16 - Sinais de Antena Direcional e Omnidirecional

Figura 17- Estrutura típica de uma Usina Nuclear Potência PWR (EPRI, IAEA, 2018)

Figura 18 - Sistema de Antena Distribuída em teste pelo EPRI (EPRI, 2017)

Figura 19: Tipos de Cabos de irradiação modelo RADIAFLEX (RFS, 2015)

Figura 20 - Exemplos de Topologia ponto a ponto (Advantech, 2013)

Figura 21 - Exemplo de Topologia estrela (Emerson, 2015)

Figura 22 - Exemplo de Topologia em árvore.

Figura 23 - Exemplo de topologia mesh (Emerson, 2015)

Figura 24 - Dados são criptografados para segurança da informação no protocolo WirelessHart [13]

Figura 25 - Exemplos de Vulnerabilidades de Segurança numa Rede Wireless (EPRI, 2009)

Figura 26 - Ilustração do falso acionamento do circuito digital pelo ruído eletromagnético (EPRI, 2009)

Figura 27 - Efeitos de EMI / RFI em dispositivos sem fio (EPRI,2009)

Figura 28 – Potência de Saída de protocolos e dispositivos *wireless* (AMS, 2015)

Figura 29 - Espectro de fontes de interferência Eletromagnética e por Radiofrequência numa instalação industrial. (PHOENIX, 2015)

Figura 30 - Esquemático de uma montagem de teste para pesquisa de emissão espectral (EPRI, 2009)

Figura 31 - Representação de Vulnerabilidade do Equipamento da Usina versus frequência do Sinal *Wireless* (AMS, 2018)

Figura 32 - Influência da frequência na Interferência de EMI e RF (AMS, 2013)

Figura 33 - Blindagem para EMI cobrindo um transmissor instalado num ambiente de sinal *wireless* (AMS, 2016)

Figura 34 - Comparação entre custos de sistema com fio e sem fio (EPRI, 2008)

Figura 35 - Aplicações com a utilização da tecnologia wireless na indústria nuclear (AMS, 2011)

Figura 36 - Percepção de obstáculos para aumentar a implantação da tecnologia wireless na área nuclear (AMS, 2011)

Figura 37 - Estatística empresa Emerson sobre vantagens do uso da tecnologia wireless (Emerson, 2017)

Figura 38 - Um sistema de monitoramento de vibração sem fio para ventiladores em uma torre de resfriamento de usina (ProSoft, 2007)

Figura 39 – Monitoração típica wireless de condição de motores na Exelon Generation, 2009.

Figura 40 - Vibração de Mancal de um motor (Srms = valor RMS), (S0-p = valor de pico)

Figura 41 - Monitoração de vibração de bombas da Usina Nuclear Angra 2, com coleta manual de dados a cada mês (Eletronuclear, 2012)

Figura 42 - Espectro de Vibração da Bomba Principal de Refrigeração (MCP) de um Reator WWER-1000 em condição original normal (a) e com degradação do mancal (b) (IAEA, 2008)

Figura 43 - Dois tipos de Sensores de Vibração Sem Fios (EPRI, 2009)

Figura 44 - Pirâmide de ativos rotativos por criticalidade (Hashemian, 2011)

Figura 45 – Instalação Temporária de um sistema *wireless* de monitoração de mancais críticos (SKF, 2018)

Figura 46 - Resultados da Monitoração da Condição do Equipamento (SKF, 2018)

Figura 47 - Mancal danificado (SKF, 2018)

Figura 48 – a) Componentes do Sistema de Telemetria Torsional do Eixo. b) Protótipo de montagem dos sensores de vibração *wireless* no eixo do turbo gerador (EPRI, 2016)

Figura 49 - Aplicações sem fio em usinas nucleares (IEEE 2011, AMS 2012)

Figura 50 - Resultados do levantamento do uso de tecnologia sem fio em usinas nucleares (IEEE, 2011)

Figura 51 - Sensor Wireless e Monitor de Posição de Válvulas (Emerson, 2015)

Figura 52 – Monitor de Radiação e Leitura no Computador via Sinal *Wireless*

Figura 53 – Painel de Monitores da Sala de Controle do Reator Argonauta e a placa Wi-Fi dentro do console para teste de EMC

Figura 54 - Placa de comunicação Wi-Fi e monitor de presença de fluxo

Figura 55 - App do EPRI para tablet com manutenção de AOV

Figura 56 - Usina Nuclear Comanche Peak

Figura 57 - Diagrama do Sistema *Wireless* de Monitoração de Equipamento em Equipamentos Não Relacionados à Segurança Nuclear de Comanche Peak (EPRI 2009, AZIMA DLI, Luminant 2014)

Figura 58 – Análise de Vibração das Máquinas de Expansão no HFIR (AMS, 2015)

Figura 59 - Projeto conceitual do Sistema *Wireless* usado na ANO (AMS, 2013)

Figura 60 - Leitores de Medidores Sem Fio Honeywell (*Wireless Gauge Readers*) instalados em medidores na Central Nuclear Vermont Yankee. (Honeywell 2010)

Figura 61 - Central de Energia Nuclear da Coréia com Monitoramento de Radiação de forma remota, em tempo real

Figura 62 - Protótipo do Aplicativo de Previsão de Dose Móvel (Claudio et al, 2017)

Figura 63 - Aplicações de Monitoração com Tecnologia *Wireless* em Usinas Nucleares de Potência (AMS, 2015)

Figura 64 - Módulos Arduino UNO, acelerômetro MPU-6050 e comunicação *wireless* Zigbee. Teste básico de funcionamento dos componentes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões IEEE para comunicações sem fio (EPRI, 2009)

Tabela 2- Padrões IEEE 802.11 para comunicações sem fio (EPRI, 2009)

Tabela 3 - Padrões ISA100 (EPRI, 2009)

Table 4 - Wi-Fi, Bluetooth, and Zigbee Standards (EPRI, 2009)

Tabela 5 - Padrões de comunicação utilizados [12]

Tabela 6 - Intenção de utilização de tecnologia wireless [12]

Tabela 7 - Exemplos de Distâncias de Zonas de Exclusão em uma usina nuclear (AMS, 2018)

Tabela 8 - Instrumentação com fio versus sem fio (ISA, 2014)

Tabela 9 - Exemplos de opções de sensores de vibração no mercado americano (EPRI, 2018) [6]

Tabela 10 - Exemplos de fabricantes de sensores wireless com especificações (EPRI, 2009)

Tabela 11 - Aplicação da Tecnologia *Wireless* em algumas usinas nucleares americanas (EPRI, 2009)

Tabela 12 - Exemplos de Potenciais Aplicações Wireless em Usinas Nucleares (EPRI, 2009)

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS e ACRÔNIMOS

AES	Advanced Encryption Standard
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable</i> (tão baixo quanto razoavelmente exequível)
APS	Análise Probabilística de Segurança
DAS	Distributed Antenna System
DCS	Distributed Control System
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSSP	Control Systems Security Program
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EMC	Electromagnetic compatibility
EPRI	Electrical Power Research Institute (Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica)
ETN	Eletronuclear
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
HART	Highway Addressable Remote Transducer
HMI	Human Machine Interface
IAEA	International Atomic Energy Agency (Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA)
I&C	Instrumentação e Controle
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
INPO	Institute of Nuclear Power Operations

ISA	Instrumentation, Systems, and Automation Society
ISDN	integrated services digital network
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
ISO	International Organization for Standardization
IT	information technology
ITU	International Telecommunication Union
Kbps	kilobits per second
kHz	kilohertz
LAN	local area network
LCD	liquid crystal display
LCOAR	limiting condition of operation action report
LOS	Line of sight
MAC	medium access control
Mbps	megabits per second
MIMO	multi-in, multi-out
NCAP	network-capable application processor
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLOS	Non-line-of-sight OTA Over-the-Air
NPP	Nuclear Power Plant (Usina Nuclear)
NPS	Nuclear Power Station
NTIA	National Telecommunications and Information Administration
OET	Office of Engineering and Technology
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing

OS	operating system
OSI	Open Systems Interconnection
PBCC	Packet binary convolucional code
PBX	Private branch exchange
PCI	Peripheral Computer Interconnect
PDA	Personal digital assistant
PEAP	Protected Extensible Authentication Protocol
PIM	Personal information management
PLC	Programmable Logic Controller
PoE	Power over Ethernet
POTS	Plain old telephone system
PSTN	Public switched telephone network
PWR	Pressurized Water Reactor
QoS	Quality of service
R & TTE	Radio and Telecommunications Terminal Equipment
RF	Radio frequency
RFID	Radio frequency identification device
RIM	Research in Motion Limited
ROI	Return on investment
RSN	Robust security network
RSSI	Receive Signal Strength Indicator
SAD	Sistema de Antena Distribuída
SIP	Session Initiation Protocol

SMB	Small/medium business
SNMP	Simple Network Management Protocol
SOHO	Small office/home office
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TEDS	Transducer electronic data sheet
TKIP	Temporal key integrity protocol
TSMP	Time Synchronized Mesh Protocol
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
UPS	Uninterruptible power system
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
UWB	Ultra-Wideband
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoWLAN	Voice over wireless local area network
WAN	Wide area network
WAVE	Wireless access for the vehicular environment
WEP	Wired equivalent privacy
WFN	<i>Wireless</i> HART Field Network
Wi-Fi	Wireless fidelity
WLAN	Wireless local area network
WLANA	Wireless LAN Association
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPA2	Wi-Fi Protected Access 2
WPAN	A Wireless Personal Area network

IEEE 802.11 Wireless LAN

- 802.11a** Up to 54 Mbps data rate, 5 Ghz band, OFDM
- 802.11b** Up to 11 Mbps data rate, 2.4 Ghz iSM band, DSSS/CCK
- 802.11g** Up to 54 Mbps data rate, 2.4 Ghz iSM band, OFDM, DSSS
- 802.11h** Adjustment for transmission power (TCP) and frequency management (DFS) to meet the requirements of the 5 Ghz band.
- 802.11n** Enables an increase of the data rate up to 300 Mbps when using channel bundling up to 600 Mbps (in the 2.4 Ghz or 5 Ghz band).
- 802.11i** Secure data encryption when using WPA2
- 802.11d** International (country-to-country) roaming.
- 802.11e** Support for QoS
- 802.11f** Access Point Protocols for supporting interoperability between base stations.

IEEE 802.15 Wireless PAN

IEEE 802.15.1 Bluetooth

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A tecnologia “wireless” (sem fio) já está incorporada no dia a dia da maioria da população mundial e já começa a ser uma opção, senão a melhor opção, para diversas aplicações comerciais, empresariais e industriais, incluindo a área nuclear.

Desde a primeira conhecida comunicação sem fio através do telégrafo, as ondas eletromagnéticas foram utilizadas para transmissão de voz, dados e outros sinais, através do rádio (AM e FM), televisão, telefones celulares, computadores, dispositivos digitais pessoais e uma multiplicidade de outros meios. Novas gerações de tecnologia sem fio estão sendo introduzidas, oferecendo taxas de transmissão de dados melhoradas em tamanho e custo reduzidos, incluindo avanços em sensores sem fio para monitoramento de processos e equipamentos industriais [1].

Nas aplicações nucleares, quando se considera a utilização da tecnologia wireless dentro dos prédios nucleares (onde os equipamentos e controles estão instalados), ainda existem questionamentos em relação a riscos com a operação segura e confiável das usinas nucleares. Podemos citar como desafios a serem ultrapassados, as interferências eletromagnéticas e de radiofrequências, segurança cibernética (cyber security), ambiente nuclear severo (radiação, temperatura, humidade etc.), propagação do sinal wireless por alta frequência nas instalações da usina, pouca experiência nos reatores nucleares de potência, fornecedores limitados, atualização em alta velocidade de mudança das tecnologias (hardware e software) desafiando os órgãos de engenharia e a relação Homem-Maquina (fatores humanos), etc.

A tecnologia sem fio (wireless) pode permitir a expansão da instrumentação de uma planta, possibilitando fornecer dados adicionais e status sobre equipamentos e componentes da usina, de modo facilitar as tomadas de decisões operacionais e de manutenção, melhorando o desempenho humano e a confiabilidade da usina.

As empresas e indústrias, incluindo poucas usinas nucleares, que vem implantando processos utilizando tecnologia wireless, apresentam resultados positivos, tanto financeiros como operacionais. Pode-se incluir nesta gama de aplicações, aquelas em que o uso de instalação de instrumentação convencional a fio é impraticável ou desafiador. Além disso, tem aumentada as aplicações em monitoração da condição operacional de máquinas rotativas, instalações em locais de difícil acesso ou que requeiram alta taxa de manutenção devido a danos nos cabos causados por problemas

ambientais (temperatura, humidade, radiação, envelhecimento etc.), rondas por operadores com tablets, monitoramento por vídeo-câmeras, monitoração de dose pessoal de radiação etc.

De acordo com estudo do EPRI [1], a instalação de um cabeamento de grau nuclear numa usina já em operação pode custar até US\$ 2,000 por pé (0,3 m), o que permite que seja abordada a possibilidade da aplicação da tecnologia sem fio, quando se necessita de melhorar o monitoramento de condições operacionais dos equipamentos da planta.

Com o movimento para uma indústria mais dinâmica e integrada com os processos globais, chamada Indústria 4.0, forçou-se uma evolução para o uso diversificado da tecnologia wireless como sendo a única forma de se obter toda informação (dados) e poder gerenciar a produção e os ativos industriais de forma online e em tempo real. Para isso é necessária a implantação da tecnologia sem fio (wireless) no chão de fábrica e nas unidades empresariais, para comunicação pessoal e controle dos processos, permitindo as tomadas de decisões e as operações industriais mais seguras e confiáveis. A ferramenta de integração tecnológica está sendo atualmente nomeada por Internet Industrial das Coisas (Industrial Internet of Things - IIoT).

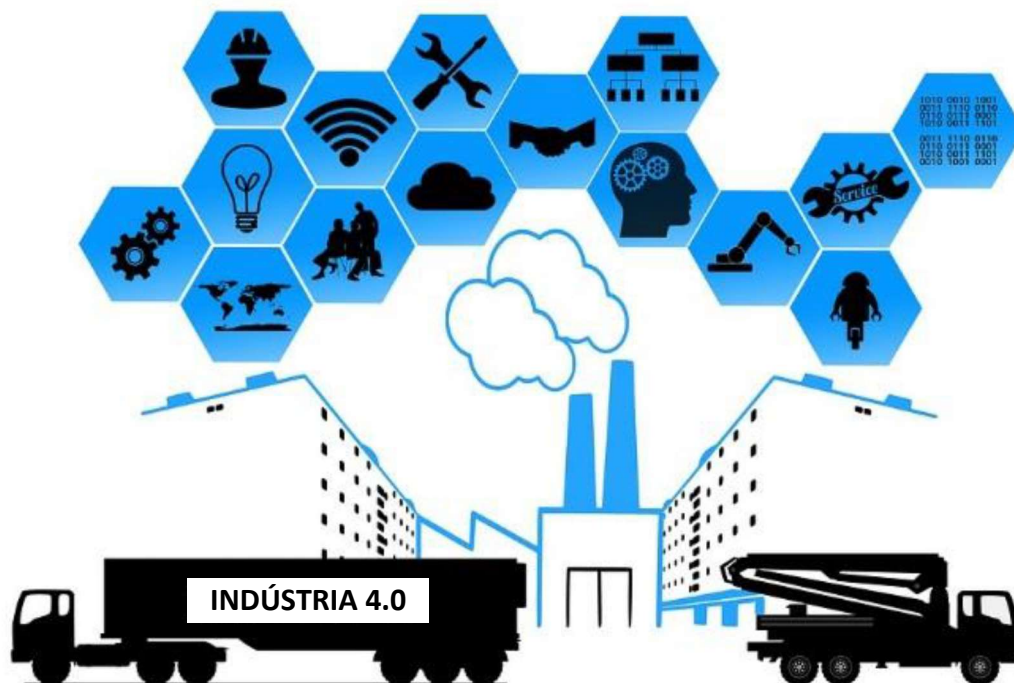


Figura 1 - Revolução moderna da Indústria 4.0 e IIoT com Conexão e Mobilidade Globalizada a partir da tecnologia WIRELESS

Entre as vantagens, segundo a consultoria Mckinsey, a Indústria 4.0 reduzirá os custos de manutenção entre 10% e 40% e o consumo de energia em até 20%, enquanto aumentaria a eficiência no trabalho em 25%.

Uma grande dificuldade para a implantação do sistema wireless é a propagação do sinal de transmissão numa instalação nuclear, devido às características inerentes de construção das diversas salas separadas por grossas paredes de concreto. Com a pesquisa do EPRI para utilização de um Sistema de Antena Distribuída (SAD) ou Distributed Antenna System (DAS), existe a possibilidade de permitir comunicações de voz e dados *wireless* em uma ampla gama de frequências, facilitando a implantação de sensores de monitoramento de condição operacional sem fio, pacotes de trabalho eletrônicos, dosimetria sem fio e outras inovações que reduzem os custos de operação e manutenção, aumentando a eficiência e a segurança da usina nuclear. No entanto, o impacto das interferências eletromagnéticas e de radiofrequências (EMI / RFI) provocados pelo DAS nos equipamentos da planta precisa ser bem avaliado.

Adicionalmente, com o uso de sensores wireless, tornou-se maneira econômica viável para implantar um sistema de monitoração remoto de equipamentos com a finalidade de melhorar o programa de manutenção preditiva (PdM), reduzindo os riscos de paradas não programadas ou de reduções de cargas, devido a falhas catastróficas de equipamentos rotativos relacionados ou não com a segurança (motores, ventiladores, compressores, geradores etc.). Por exemplo, um dia de perda de geração elétrica da Usina Nuclear Angra 1 pode chegar a R\$3.800.000,00 (tarifa ANEEL de R\$247,47 por Megawatt em 18/12/18, considerando a potência nominal de 100% equivalente a 640 MWe).

O método atual para a aplicação da manutenção preditiva para monitoramento da condição operacional de motores é trabalhoso, oneroso e requer muito tempo, para realizar todas as inspeções periódicas de campo com equipamentos portáteis e, às vezes, em locais de risco radiológico e de difícil acesso.

Existe também um grande movimento competitivo na indústria com produção de dispositivos contendo tecnologia wireless além da pressão dos novos profissionais (gestores, engenheiros, técnicos, administradores, investidores, autoridades, acadêmicos, pesquisadores, atletas etc.) requerendo mobilidade, informação atualizada e disponível, compartilhamento etc.

A nova geração de trabalhadores cresceu em um mundo conectado e está familiarizado com as tecnologias digitais. Ferramentas tais como dispositivos portáteis

para entrega de instruções de campo, identificação de componentes de plantas e gerenciamento de trabalho oferecem um enorme potencial para melhorar o desempenho humano. (EPRI Journal, 2017, Associação Mundial de Operadores Nucleares (World Association of Nuclear Operators – WANO, Prozesky).

Palavras chaves: Tecnologia Wireless, Monitoramento em Usina Nuclear, Condições Operacionais de Motores.

1.2. Objetivo do Estudo

Promover uma pesquisa de alto nível na teoria e desenvolvimento atual da tecnologia wireless, visando sua aplicação nas usinas nucleares, haja visto a necessidade de se buscar a melhoria operacional dos equipamentos rotativos das usinas, a fim de se evitar a perda de geração ou riscos a confiabilidade e segurança das mesmas.

Descrever as vantagens e as desvantagens da aplicação da tecnologia wireless em comparação com a instalação a cabo (por fio) em conformidade com a atual busca de mobilidade e disponibilidade da informação em tempo real e online.

Abordar as ações para continuidade do estudo de viabilidade, com propostas de experiências em laboratório, além de apresentar casos de sucesso da implantação da tecnologia wireless na indústria, em particular na área nuclear, destacando-se os desafios e dificuldades inerentes do uso de tecnologia, que levam a aplicação lenta e ainda pouco utilizada nas usinas que estão em operação.

Atualmente, não há testes de desempenho ou qualificação geralmente aceitos para sensores de fibra óptica e sem fio que permitam sua ampla aceitação na indústria nuclear e, portanto, que possibilitem a realização dos benefícios financeiros desses sensores. Em particular, operabilidade e confiabilidade de longo prazo não foram demonstradas para muitas dessas plataformas [2].

1.3. Justificativa e Uso dos Resultados

Com a extensão de operação das usinas para 60 anos, a confiabilidade operacional dos equipamentos rotativos críticos passou a ser uma grande preocupação para a equipe da manutenção e conseqüentemente de todo o corpo gerencial da planta.

A necessidade de implantação de novas técnicas de monitoramento, assim como o aumento e qualidade dos dados operacionais motivaram as equipes de desempenho a procurar alternativas técnicas e econômicas para evitar perdas forçadas

de geração ou quebras catastróficas de equipamentos importante para a disponibilidade e segurança da planta.

O uso da tecnologia wireless passou a ser a solução para a implantação de monitoramento contínuo para detecção antecipada de falhas, em contrapartida às instalações de novos sensores a cabo, que em geral são onerosas e por muitas vezes tecnicamente trabalhosas.

Dentro do escopo do trabalho, a viabilidade da implementação de redes de sensores wireless dentro de usinas nucleares poderia permitir maior eficiência de processo e aumentar a segurança, permitindo o gerenciamento de trabalho móvel com conectividade on-line e disponibilidade dos dados nas 24 horas dos sete dias da semana (24/7).

Entretanto, este trabalho também alerta que para ser viável, cada solução de implantação da tecnologia wireless terá de seguir um processo detalhado de projeto, estudo e implementação de acordo com as características das instalações e dos tipos de equipamentos da usina, devido a problemas que poderão ser causados por sensibilidades a interferências eletromagnéticas, e por radiofrequência, além da preocupação com os ataques cibernéticos. Soluções de contornos para permitir a compatibilidade e coexistência da tecnologia wireless já existem e poderão ser aplicadas.

1.4. Estrutura do Trabalho

Nos capítulos a seguir, serão apresentados os tipos de redes, protocolos e padrões de tecnologias wireless abertas e proprietárias conhecidas no mercado, com suas vantagens e desvantagens, incluindo algumas aplicações industriais. Mostraremos também a razão destas normas terem sido criadas para facilitar a utilização da tecnologia wireless pelos usuários finais e fabricantes.

Serão descritas as técnicas de manutenção preditiva (PdM) para Monitoramento de Condições Operacionais de Motores, como um dos escopos deste trabalho, com o devido emprego da tecnologia Wireless, objetivando a melhoria dos resultados operacionais e das práticas de manutenção.

Adicionalmente, descreveremos os testes de interferência eletromagnética e de radiofrequência requeridos por normas para projetos de tecnologia wireless em usinas nucleares, além de um teste básico de compatibilidade eletromagnética com o emprego

da tecnologia wireless, realizado no Reator Nuclear de Pesquisa Argonauta, pertencente ao Instituto de Energia Nuclear (IEN), Rio de Janeiro - Brasil.

2. DESCRIÇÃO DAS TECNOLOGIAS WIRELESS

A tecnologia sem fio veio preencher uma real necessidade do mundo moderno, que é a mobilidade, além da necessidade de acesso a informação, baseado em um Banco de Dados nas 24 horas do dia nos 7 dias da semana (24/7).

A figura 2 apresenta uma ilustração do avanço da tecnologia digital com possibilidade de acesso e armazenamento da informação em nuvem [3].

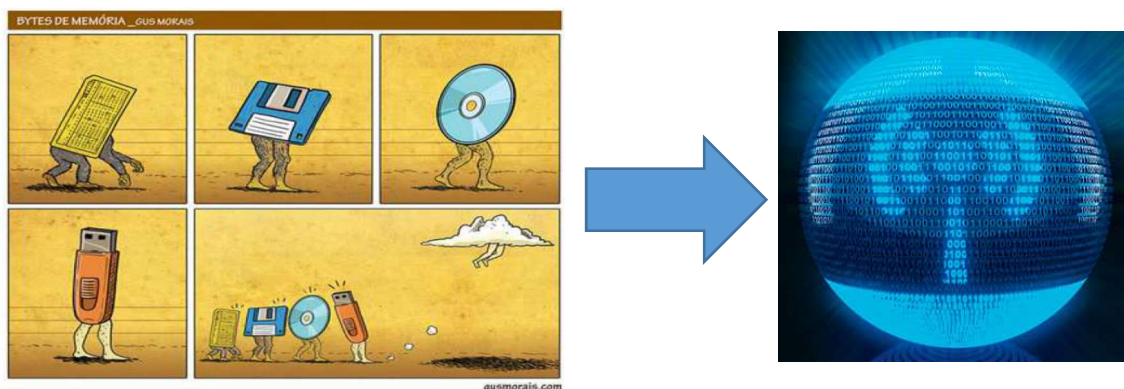


Figura 2 - Avanço da tecnologia digital para armazenamento de dados (Advantech, 2013) e Rede de Dados Wireless

Essa evolução tecnológica acabou chegando ao chão de fábrica com adoção de Redes Ethernet na Automação Industrial, possibilitando a monitoração, controle e possivelmente até a atuação de sistemas de segurança de plantas de forma remota, mais segura e confiável, baseada em dados “online” e em tempo real.

A aplicação de tecnologia *wireless* começa a ser utilizada de forma lenta e limitada na indústria nuclear, principalmente para integração de voz/vídeo/dados, monitoração remota de equipamentos, gerenciamento de paradas, processo de controle de trabalho, existindo um grande potencial para melhorar a produtividade, a qualidade dos processos, a confiabilidade e a segurança. Além disso, o histórico de experiência operacional da indústria nuclear mostra que o uso de rádios *walkie-talkie* causou desarmes e paradas não programadas de usinas de potência nuclear.

Atualmente existem 453 reatores nucleares de potência (292 do tipo de Reator por Água Pressurizada - PWR) em operação em 30 países, onde mais de dois terços

deles tem mais de 30 anos de vida [4]. Esses reatores precisam de modernizações para continuarem operando com segurança e confiabilidade, assim como continuar financeiramente viável no mercado de energia.

Por exemplo, pelo fim de 2016, a *Nuclear Regulatory Commission – USA* (NRC) emitiu 85 renovações de licenças, estendendo o tempo de operação delas de 40 para 60 anos (*World Nuclear Association* [5]). Além disso, 55 reatores estão em construção em 15 países com aplicação de moderna tecnologia digital [4]. Veja na figura 3 a foto da sala de controle da Usina Yangjiang 5, que é o primeiro reator de projeto chinês (ACPR1000) conectado à rede em 2018 com tecnologia de controle totalmente digital.



Figura 3 - Moderna Sala de Controle Digital da Usina Chinesa Yangjiang 5 (WNA, 2018)

Existe uma alta demanda para monitoração contínua dos processos e ativos, automação das tarefas de monitoramento manual das condições operacionais dos equipamentos, otimização da manutenção, visando integrar a nova geração “conectada” de força de trabalho, de tal forma a reduzir as perdas de geração, sem a afetar a segurança das plantas de potência nucleares. O uso de uma infraestrutura de tecnologia *wireless* será uma ferramenta eficaz para a implementação das expectativas atuais. Considerando-se apenas as plantas de geração elétrica, as usinas nucleares estão atrasadas em relação às outras usinas de combustível fóssil [6].

Um estudo realizado na Usina Nuclear Diablo Canyon (EUA) estimou que ela poderia economizar 6 milhões de dólares ou 50.000 homem-hora por ano com o uso de comunicação *wireless* e *tablets* habilitados em atividades de manutenção [7].

Com um investimento em testes de compatibilidade eletromagnética e de coexistência de dispositivos *wireless*, a Usina Nuclear Diablo Canyon implantou a tecnologia *wireless* em todo o sítio, incluindo dentro dos prédios potência nuclear [8].

As redes cabeadas (“WIRED”) apresentam uma segurança aparente, uma vez que seus usuários são capazes de observarem visualmente as suas rotas, ligações e diagramas esquemáticos. Na utilização da tecnologia sem fio (*wireless*) o usuário terá de confiar na existência correta da transmissão dos dados/vídeo/voz por ondas eletromagnéticas e com emprego de softwares/protocolos especiais. Além disso, o usuário quer ter a segurança de que os dados não poderão ser alterados ou interrompidos por ações de invasores informáticos, os chamados ataques cibernéticos ou *cyber attacks* provocados por *hackers*) ou mesmo por atitudes de seus técnicos, por desconhecimento ou uso indevido da tecnologia ou de acessórios (por exemplo, pen drives), introduzindo vírus ou falhas etc.

As figuras 4 e 5 apresentam simbolicamente as estruturas de redes cabeadas e sem fio (*wireless*), onde pode ser observada a versatilidade de arranjo desta última [3].

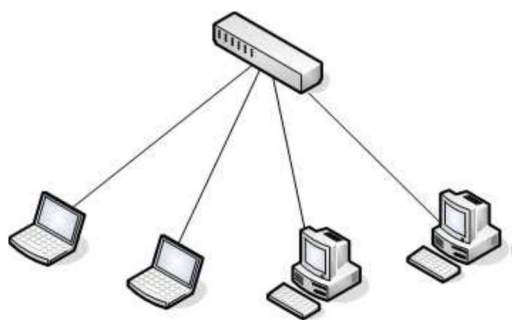


Figura 4 - Rede Cabeada:
Elementos: Switch, Clientes,
Cabos

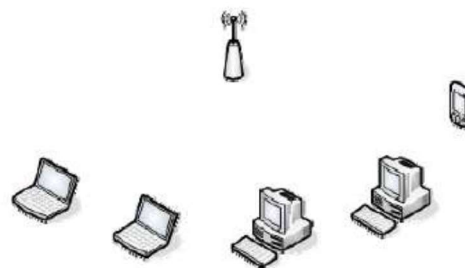


Figura 5 - Rede Sem Fio: Elementos:
Switch, Clientes, Access Point, Clientes
wireless, facilidade para ampliação [45]

Um sistema típico de aquisição de dados sem fio contém quatro componentes principais: um computador que serve como controlador de rede (*network controller*), um ponto de acesso sem fio (*local access point*), um ponto de acesso remoto sem fio (*remote access point*) e uma unidade de aquisição de dados remota em rede (*remote data acquisition*) [2].

Os Pontos de Acesso são alguns dos mais fundamentais dispositivos de uma rede WLAN. Eles são essencialmente hubs que direcionam o tráfego de redes entre dispositivos de LAN com fio, dispositivos clientes sem fio e, potencialmente, outros pontos de acesso sem fio. Veja a figura 6 ilustrativa de ponto de acesso.

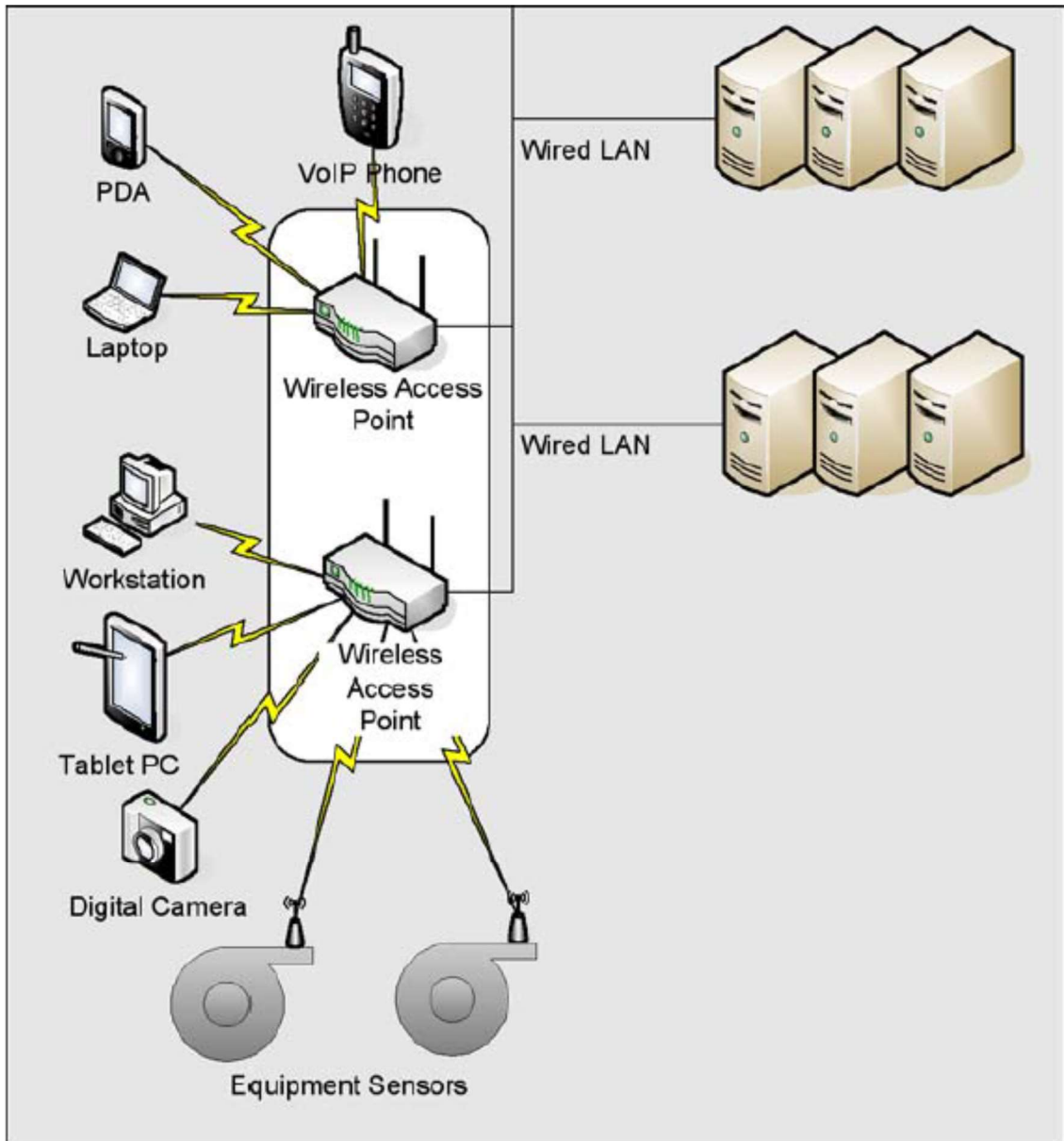


Figura 6 – Pontos de Acesso dentro de uma Rede *Wireless* WLAN (EPRI, 2006)

[9]

Existem diversos tipos de transmissão de dados wireless, cada um com suas vantagens e limitações. Algumas organizações procuraram regular as tecnologias wireless, incluindo as abaixo:

- IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
- ISA - International Society for Automation
- HART (Highway Addressable Remote Transducer) Communication Foundation



Além dos protocolos da tecnologia wireless mais conhecidos pelo público, Wi-Fi e Bluetooth, também existem aquelas que foram desenvolvidas para aplicações industriais, possibilitando mais segurança e confiabilidade na transmissão e manipulação dos dados gerados. Destes, os mais empregados são: *WirelessHART*, *ISA-SP100.11a* e o *ZigBee*. Cada um destes apresenta características próprias, com vantagens e desvantagens para possíveis aplicações e benefícios no uso industrial.

Um determinado projeto de rede sem fio também pode considerar a interação com outros sistemas cabeados ou digitais, tais como *ASInterface*, *PROFIBUS*, *Ethernet* e *WiredHart*.

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), conhecidas pela sigla *WSN* (em inglês: *Wireless Sensor Networks*), podem ser definidas como redes de dispositivos capazes de transmitir e receber dados usando ondas eletromagnéticas.

Fatores importantes a serem considerados quando se deseja construir uma rede de sensores sem fio (*WSN*) em ambientes industriais:

- **Confiabilidade:** Trata-se da porcentagem de dados exatos que é recebido com sucesso no destino final, está associada à estabilidade que representa a porcentagem de pacotes de dados transmitidos com sucesso;
- **Latência:** É a medida de atraso de tempo entre o momento de transmissão do pacote de dados e o momento de chegada ao receptor, diversos fatores afetam esta variável como a qualidade da conexão, tipo de antena, interferências no ambiente etc.;
- **Segurança:** Trata-se do suporte para proteção dos dados trocados entre os dispositivos da *WSN* através de um sistema de autenticação e da criptografia

dos dados. Este quesito é obrigatório numa instalação nuclear, por proporcionar maior privacidade, integridade dos dados e segurança;

- Taxas de atualização de dados transmitidos ou recebidos pelos sensores: Esta variável afeta principalmente o consumo de energia, sendo necessário um cálculo que relacione a capacidade da bateria e da taxa de atualização;
- Consumo de energia: Por depender de diversos fatores, dentre eles a taxa de atualização, dos tipos de sensores do mercado, do protocolo de transmissão, qualidade da conexão entre dispositivo etc.;
- Alcance da transmissão sem fio: referente a cobertura do sinal e é determinada pela potência do transmissor, frequência do sinal, obstáculos no trajeto, taxa de dados transmitidos, interferências eletromagnéticas, entre outros. Esses fatores por si próprios ou em conjunto geram problemas de reflexão, absorção e refração do sinal;
- Custo: deve-se levar em conta o custo do projeto, dos dispositivos, da instalação, manutenção etc. Considerar a possibilidade da fácil escalabilidade, obtenção dos dados de forma remota e a comparação do custo por instalação cabeada por fiação qualificada ou de fibra ótica.

Cada aplicação de tecnologia wireless irá requerer um projeto específico, considerando-se as diversas características e requisitos de performance necessários, seja para telefonia por internet (VoIP – *Voice over Internet Protocol*), dispositivos de dosimetria *wireless*, sensores *wireless* para monitoração de condição operacional de ativos, dispositivos móveis (*tablet, notebooks, RFID etc.*) entre outros, assim como as particularidades da instalação e os tipos de equipamentos da planta nuclear.

A maioria dos custos para implantação de um projeto de tecnologia wireless numa usina nuclear de potência em operação se deve principalmente ao valor da modificação de projeto. A instalação custa menos e o *hardware* necessário, normalmente tem menor valor de custo [10].

2.1. REDES DE DADOS WIRELESS

As redes de dados wireless estão classificadas em 4 categorias de acordo com as áreas de abrangência, conforme a seguir

2.1.1 WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK (WPAN)

As Redes de Área Pessoal Sem Fio (WPAN), que se destina a um usuário individual para dispositivos dentro de um curto alcance de aproximadamente 10 metros. Isso é aceitável para dispositivos usados na proximidade de sua fonte de comunicação [1], como aparelhos celulares, impressoras, ratos (mouse) e teclados sem fio de computadores ou fones de ouvido/microfones sem fio. O principal padrão utilizado por esta tecnologia é o padrão IEEE 802.15.1, onde se encontra o *Bluetooth*. Existem outros dois padrões que fazem parte das WPAN, que são o IEEE 802.15.3, denominado *Ultra Wide Band* (UWB) para “vídeo streaming” e o IEEE 802.15.4, mais conhecido como *ZigBee*.

2.1.2 WIRELESS LOCAL AREA NETWORK (WLAN)

As Redes de Área Local Sem Fio (WLAN), oferecem conectividade dentro de uma faixa de aproximadamente de 100 m. Elas visam atender a pequeno escritório, laboratórios ou campus [1]. As WLAN são alternativas ou extensões às tradicionais redes cabeadas, por oferecerem as mesmas funcionalidades, com maior facilidade de instalação e conectividade em áreas prediais ou campus, flexibilidade e rapidez de comunicação. Os protocolos dentro de uma WLAN são os mais aplicáveis às redes sem fio e ao monitoramento de condições de equipamentos sem fio em uma usina de energia nuclear, uma vez que objetivam fornecer dispositivos de custo moderado adequados para aplicações comerciais, educacionais e industriais (EPRI). As WLAN seguem principalmente o padrão IEEE 802.11. Nessa faixa de rede estão os protocolos WirelessHart, ISA100, Wi-Fi e também o ZigBee.

2.1.3 WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK (WMAN)

As Redes de Área Metropolitana Sem Fio (WMAN) tem um alcance muito grande, podendo cobrir mais de 10 Km, atingindo vários blocos da cidade, ou em alguns casos, toda uma área metropolitana [1]. Nesta rede, o principal protocolo é o *World Interoperability for Microwave Access* - WiMAX, que tem uma boa tolerância a reflexões, ter maior capacidade de penetração em obstáculos e permitir um maior número de conexões se comparadas as WLANs convencionais. As WMAN obedecem ao padrão IEEE 802.16 e fazem a função de redes sem fio de banda larga, sendo opção de para as redes de fibra ótica.

2.1.4 WIRELESS WIDE AREA NETWORK (WWAN)

As Redes de Área Ampla Sem Fio (WWAN) cobrem grandes áreas geográficas, incluindo redes globais para fornecer serviço de telefonia celular de dados e voz [1]. A WWAN atende ao padrão IEEE 802.20 a protocolos GSM, 3G, 4G etc.

A Figura 7 apresenta a cobertura da faixa operacional das redes sem fio em função dos diferentes protocolos, dos padrões, e das taxas de dados sem fio. Vale observar que alguns protocolos de rede podem se encaixar em diferentes categorias de rede. Esses protocolos incluem Bluetooth, ZigBee e Wi-Fi.

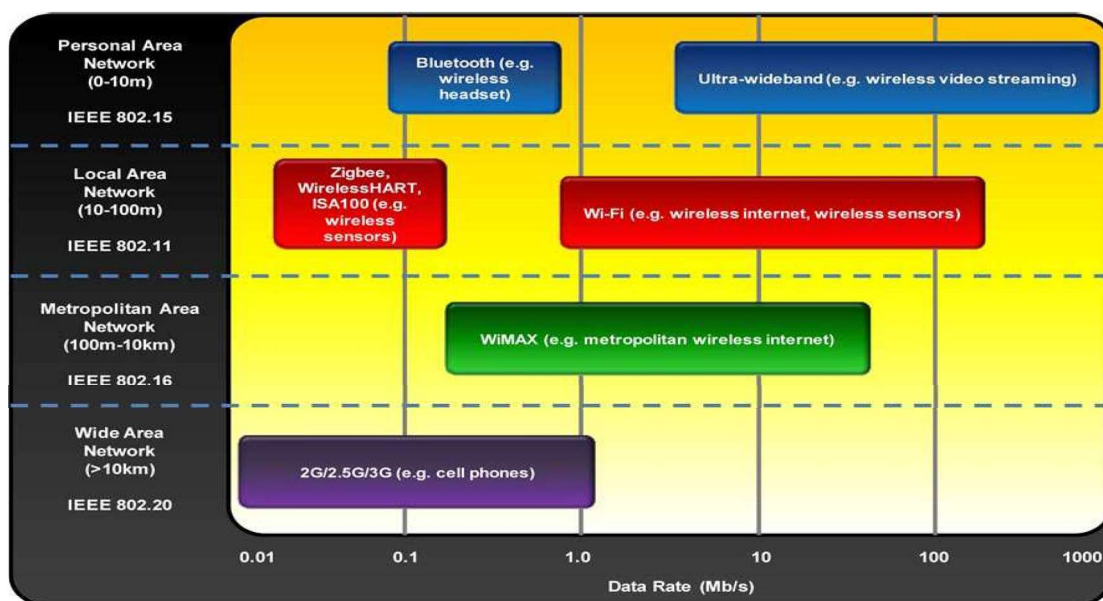


Figura 7 - Taxa de dados versus área operacional para redes e protocolos sem fio (EPRI, 2009).

Os protocolos dentro da WLAN visam prover menor custo para aplicações comercial, industrial e educacional, sendo os mais aplicáveis a redes *wireless* e a monitoração de condições operacionais de equipamentos em uma usina nuclear de potência [1].

2.2 PADRÕES INDUSTRIAIS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

A padronização dos protocolos de comunicação em redes é importante para permitir a comunicação entre os equipamentos de diferentes fabricantes, facilitar o uso das redes, a manutenção e a expansão.

Ao se escolher qual padrão de comunicação de rede *wireless* deve ser levado em conta, o protocolo a aplicação, o alcance da rede, a taxa de transmissão dos dados,

os tipos de dados a serem transmitidos, a relação sinal ruído, as interferências eletromagnéticas e físicas, além dos níveis de segurança desejados.

Existem vários padrões industriais de comunicação sem fio estabelecidos internacionalmente. Os três principais para este trabalho são: partes do IEEE 802, ISA100 e WirelessHART.

2.2.1 PADRÕES IEEE

A estrutura da indústria para aplicativos sem fio vem da família de padrões de rede IEEE 802. Esses padrões (ver Tabela 1) foram desenvolvidos para fornecer requisitos básicos para o tamanho da rede, área de cobertura, taxa de dados, criptografia, autenticação e requisitos de energia para diferentes aplicativos sem fio. Por exemplo, o conjunto de padrões 802.11, comumente conhecido como padrões comerciais de produtos Wi-Fi, foi desenvolvido para permitir aos usuários de computadores acesso sem fio à internet e outros dispositivos de rede. Conforme mostrado na tabela, existem vários protocolos comerciais que se baseiam nesses padrões IEEE. Estes incluem Wi-Fi, Bluetooth, Ultra-Wideband (UWB), ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a e Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Esses protocolos operam nas diversas taxas de dados e níveis de potência especificados pelo padrão e precisam ser compatíveis com a aplicação apropriada.

Tabela 1 - Padrões IEEE para comunicações sem fio (EPRI, 2009)

IEEE Padrão	Nome Comercial	Frequência Operacional	Características	Aplicação Comum
802.11	Wi-Fi	2.4 GHz, 5.7 GHz	WLAN, Alta Taxa de Dados	Network – Rede / Conectividade de Internet
802.15.1	Bluetooth	2.4 GHz	WPAN, Baixa taxa de Dados	Dispositivos Sem Fio / Periféricos
802.15.3	UWB WiMedia	~5 GHz	WPAN, Curta Distância Alta Taxa de Dados	Transmissão de Vídeo
802.15.4	ZigBee, ISA100.11a, * WirelessHart	868/915 MHz, 24 GHz	WLAN, Baixa taxa de Dados	Rede de Sensores (Wireless Sensor Network)
802.16	WiMAX	2–11 GHz, 10–60 GHz	WMAN, Alta Taxa de Dados	Acesso à Internet sem fio de Banda Larga

2.2.1.1 802.11

A maioria dos produtos que aderem à família de padrões IEEE 802.11 (por exemplo, 802.11a / b / g / n) são considerados certificados pela Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). A Aliança "Wi-Fi Alliance", que detém os direitos sobre a marca registrada "Wi-Fi", definiu como "produtos de rede local sem fio (WLAN) baseados nos padrões IEEE 802.11." Os padrões mais utilizados dentro do 802.11 são 802.11b e 802.11g. Ambos utilizam a banda industrial, científica e médica de 2,4 GHz (ISM – Industrial, Scientific and medical). Ao utilizar a banda de frequência de 2,4 GHz, o equipamento 802.11b / g pode ocasionalmente experimentar interferências de fornos de microondas, telefones sem fio e dispositivos Bluetooth, que operam nesta faixa de radiofrequências sem licença. A interferência é comumente gerenciada através do uso de técnicas de espectro espalhado ou espalhamento espectral, que são discutidas na seção de Problemas de Tecnologia Sem Fio deste trabalho. Como pode ser visto na Tabela 3-2, a diferença primária para o usuário entre 802.11b e 802.11g é a taxa de dados. Também deve notar-se que o 802.11g é compatível com o 802.11b. É capaz de usar as mesmas taxas de dados e esquemas de modulação associados como 802.11b. Isso facilitou a transição para dispositivos 802.11g mais rápidos. O padrão IEEE 802.11n, que foi analisado desde 2003, foi aprovado em setembro de 2009. Como se pode ver, o 802.11n possui capacidades de taxa de dados significativamente maiores do que as demais. A Tabela 2 mostra uma comparação dos quatro padrões gerais de protocolo IEEE 802.11.

Tabela 2- Padrões IEEE 802.11 para comunicações sem fio (EPRI, 2009)

IEEE Padrão	Frequência	Taxa de Dados	Faixa
802.11a	5.0 GHz	54 Mbps	120 m (394 ft)
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps	140 m (459 ft)
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	140 m (459 ft)
802.11n	2.4/5.0 GHz	248 Mbps	250 m (820 ft)

As redes Wi-Fi 802.11 são tipicamente usadas para computadores portáteis, dispositivos de mão sem fio, sensores sem fio (temperatura, vibração etc.), telefonia de Protocolo de Internet (IP) e outras aplicações de rede de área local.

2.2.1.2 802.15.1

O padrão IEEE 802.15.1, ou a especificação Bluetooth, foi criado como uma alternativa de baixa potência para Wi-Fi para aplicações sem fio. É mais aplicável para dispositivos de curto alcance usados com computadores e telefones celulares, como

teclados, mouse, impressoras e fones de ouvido. O Bluetooth usa uma técnica de espalhamento espectral por saltos frequência (FHSS), que possui melhores propriedades de interferência do que os sistemas de frequência fixa. Embora o Bluetooth seja uma alternativa de menor potência e menor taxa de dados ao Wi-Fi, seus usos são limitados para as aplicações de monitoramento de condições operacionais.

2.2.1.3 802.15.4

Os produtos montados neste padrão usam uma taxa de dados muito baixa de 25 Kbps, o que permite uma vida útil da bateria de vários meses a vários anos, dependendo da aplicação e do ciclo de trabalho. O ZigBee, um protocolo que usa o padrão de comunicações 802.15.4, foi desenvolvido como uma solução de baixa potência e baixa taxa de dados para aplicações de sensores, como automação residencial (abridores de portas de garagem, controles remotos de TV, controles de aquecimento e iluminação etc.) ou monitoramento industrial e de processo.

Observe que ISA100.11a e WirelessHART são dois padrões adicionais especificamente projetados em parte para sensores sem fio em aplicações industriais, que também usam o protocolo de comunicação 802.15.4. Esses padrões são descritos com mais detalhes a seguir, pois foram desenvolvidos em parte para abordar questões de segurança e latência associadas ao ZigBee.

2.2.1.4 802.15.3

A Ultra Banda Larga (*Ultra-Wideband*, UWB) transmite sinais de rádio de potência ultrabaixa com pulsos elétricos muito curtos, muitas vezes na faixa de picosegundos, ocupando uma ampla faixa de frequência. O receptor UWB deve então transformar essas explosões de ruído em dados, pela detecção da sequência particular de pulso enviada pelo transmissor. Em fevereiro de 2002, a Comissão Federal de Comunicações (FCC) dos Estados Unidos alocou o espectro de rádio de 3.1 GHz a 10.6 GHz para uso dos dispositivos UWB. Este sinal de banda larga permite que o UWB suporte altas taxas de dados sem fio de 480 Mbps até 1,6 Gbps em distâncias até vários metros, além das quais as taxas de dados UWB caem consideravelmente. A distância de transmissão pode ser aumentada, mas a FCC restringiu a potência de transmissão para menos de -41.3 dBm / MHz.

O UWB tem menor consumo de energia e fornece maior velocidade do que as redes Wi-Fi 802.11 ou os produtos Bluetooth. O UWB deverá fornecer transmissão de vídeo sem fio para sistemas de home theater, TV a cabo, segurança e navegação

automáticas, imagens médicas e vigilância de segurança. Como a energia do sinal UWB é distribuída em uma faixa de frequência muito ampla (500 MHz), a interferência que causa a outros sinais que operam dentro da banda de frequência UWB é extremamente pequena. Isso pode permitir a operação simultânea de transmissores UWB e outros sistemas de comunicação existentes com interferências quase indetectáveis.

2.2.1.5 802.16

Oficialmente conhecido no IEEE como WMAN, o WiMAX é uma tecnologia sem fio que permite acesso à internet de alta velocidade com um alcance de até 80 km. O WiMAX suporta taxas de dados de até ~ 70 Mbps e pode ser usado para aplicações como a extensão de conexões de banda larga tradicionalmente cabeadas a locais de difícil acesso ou em áreas metropolitanas, onde o acesso à Internet em toda a cidade com altas velocidades é desejado. Quando usado em conjunto com uma rede menor, como Wi-Fi, o WiMAX pode fornecer uma infraestrutura para acesso à Internet sem fio.

2.2.1.6 REDES E PROTOCOLOS SEM FIO PARA A INDÚSTRIA DE ENERGIA NUCLEAR

Os protocolos mais comuns para uso em aplicações industriais como as usinas nucleares, incluem 802.11 e 802.15.4. Normalmente, as redes de campo 802.15.4 são usadas para sensores sem fio de baixa potência, operados por bateria, que podem incluir pressão, nível, fluxo, temperatura, vibração média de raiz quadrática (rms), monitoração de vazamento de vapor, indicação de posição de válvula etc. O padrão de comunicações 802.11 é comumente usado para acesso à rede, telefonia via Internet e sensores sem fio, como temperatura, vibração etc. Ao escolher uma solução sem fio, é importante entender os prós e os contras associados ao sistema em questão. Por exemplo, uma solução de baixa potência (802.15.4) normalmente irá fornecer uma taxa de dados mais baixa do que uma solução de alta potência (802.11) [1].

2.2.2 PADRÃO ISA100

A ISA é uma organização global sem fins lucrativos que desenvolve padrões, certifica profissionais da indústria, fornece educação e treinamento, e publica livros e artigos técnicos relacionados à automação industrial. A família de padrões ISA100 é chamada de Sistemas Wireless para automação industrial. Numerosas organizações e fabricantes se uniram com a ISA para criar os padrões ISA100. O objetivo desses padrões é estabelecer um protocolo industrial para tecnologias sem fio que possam ser adotadas pelos fabricantes para criar dispositivos sem fio que sejam interoperáveis e que atendam às exigências rigorosas de um ambiente industrial. Os padrões específicos

associados ao ISA100 podem ser vistos na Tabela 3. Este conjunto de padrões destina-se a fornecer uma metodologia abrangente para a implementação de dispositivos sem fio em aplicações industriais.

Tabela 3 - Padrões ISA100 (EPRI, 2009)

Padrão	Nome
ISA100.11a	Aplicações de Processo
ISA100.15	Rede backbone / backhaul sem fio
ISA100.14	Rede Sem Fio Confiável
ISA100.21	Rastreamento e identificação de pessoas e ativos
ISA100.12	Aplicações de rede convergentes WirelessHART e ISA100.11a

Os dispositivos e sistemas compatíveis com o ISA100 já estão em uso em algumas indústrias pesadas. Por exemplo, os produtos de rede OneWireless da Honeywell e também da Yokogawa, usados para medições de processos sem fio, são dispositivos compatíveis com ISA100. 11a (veja Figura 8).

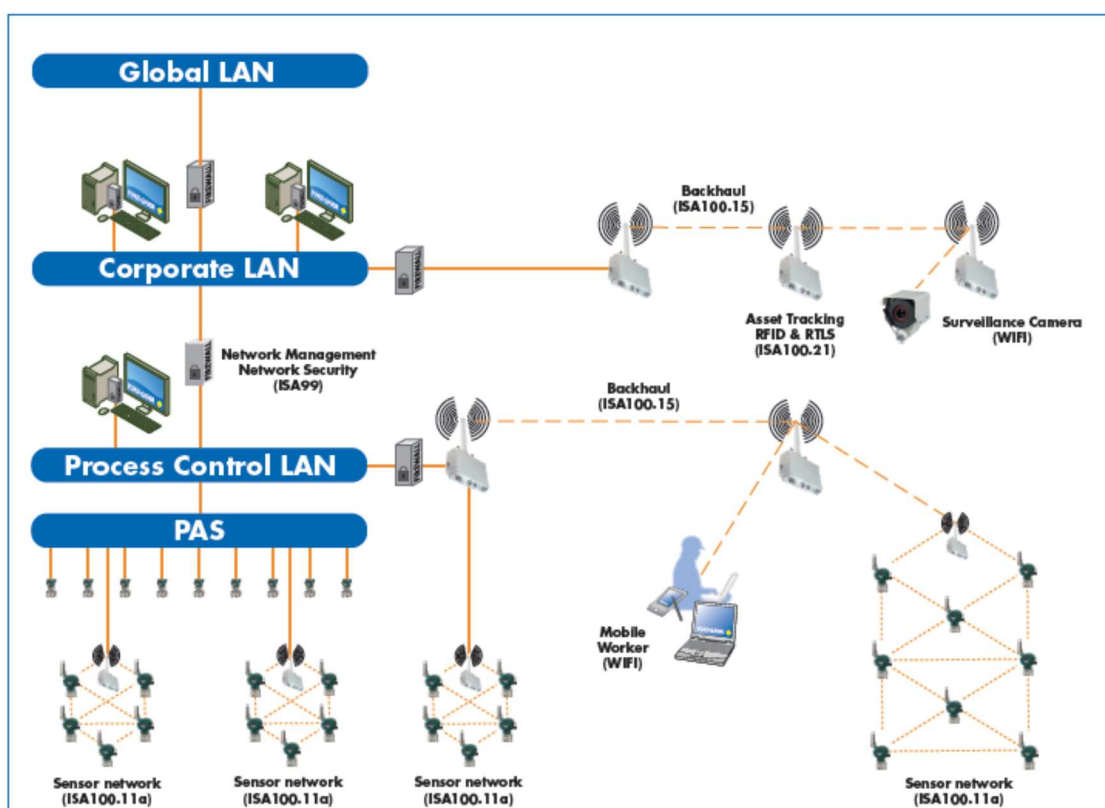


Figura 8 - Configuração de rede típica usando ISA100.11a (YOKOGAWA, 2015)

Este padrão se destina a fornecer operação sem fio confiável e segura para aplicações de monitoração não crítica, alerta, controle supervisório, controle de “loop” aberto e controle de loop fechado. Além disso, também procura estabelecer baixo consumo de energia, restrições de latência, permitir aumento de escala, minimizar problemas de interferência eletromagnética, propiciar interoperabilidade entre dispositivos, fabricantes e protocolos diversos.

A Figura 9 ilustra a flexibilidade de uma rede universal Wireless ISA100 com uma rede mesh composta de dispositivos de vários fabricantes. Os dois dispositivos HART instalados, conectados a um controlador, estão respondendo simultaneamente dados digitais HART à rede Wireless ISA100 via adaptadores ISA100 – WirelessHART [11].

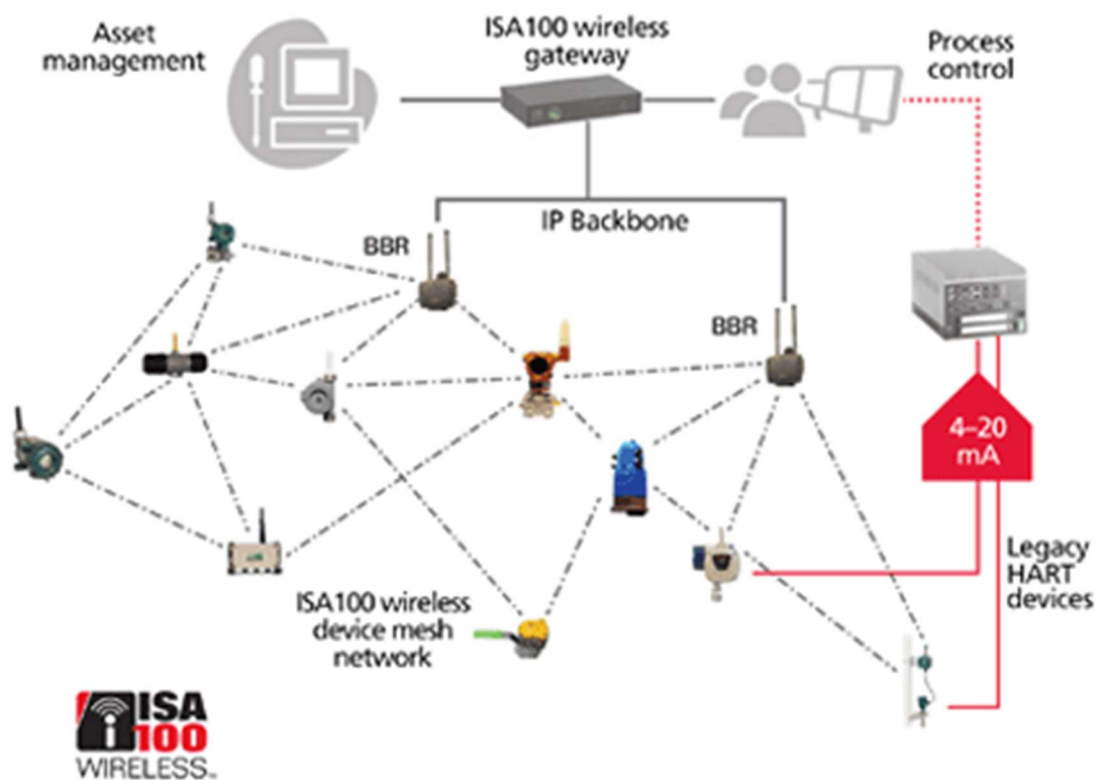


Figura 9 - Flexibilidade de uma Rede Wireless ISA100 (ISA, 2014)

O padrão *wireless* ISA100 está projetado para permitir relatórios tão freqüentes quanto a cada 0,25 segundos com uma latência de transmissão de 0,10 segundos em configurações estruturadas. As taxas de relatório mais rápidas são consideradas (pela maioria dos padrões) inadequadas para a operação alimentada por bateria, neste momento (ISA, 2014).

O padrão *wireless* ISA100 está projetado como uma extensão da internet, construída na plataforma da norma IPv6 “Internet das Coisas” “Internet of Things (IoT)”.

A IPv6 é um esquema de endereçamento que permite a um número essencialmente ilimitado de dispositivos serem endereçáveis individualmente (ISA, 2014).

Em termos de classificação da importância para aplicação da tecnologia wireless na automação industrial, a Norma ISA -SP100.11 estabeleceu 5 classes, discriminadas e mostradas na figura 10:

SEGURAÇA	Class 0: Ação de Emergência Sempre Crítico	
Controle	Classe 1: Circuito fechado, controle regulatório Geralmente Crítico	
	Classe 2: Circuito fechado, controle supervisorio Geralmente Não Crítico	
	Classe 3: Controle de Circuito aberto Homem no Circuito de Controle	
Monitoramento	Classe 4: Alarmes Consequências operacionais de curto prazo (ex. evento relacionado a manutenção)	
	Classe 5: Registro e Entrada / Saída de Dados Sem consequências operacionais imediatas (ex. cleta de histórico, experiência operacional, manutenção preventiva)	

Figura 10 - Classificação de aplicações de automação industrial. (ISA-SP 100.11, 2006)

2.2.3 PADRÃO WirelessHART

O Protocolo de Transdutor Remoto Endereçável de Alto Fluxo (HART - Highway Addressable Remote Transducer) foi originalmente desenvolvido no final da década de 1980 por Rosemount, Inc. Mais tarde, foi transferido para a HART Communications Foundation, uma organização sem fins lucrativos, no início da década de 1990. Desde então, o HART tornou-se um protocolo de comunicação bidirecional de uso comum entre instrumentos de campo inteligentes e sistemas hospedeiros (host). Ele opera enviando e recebendo informações digitais através de fios analógicos entre dispositivos e sistemas de controle ou monitoramento.

Em 2007, o WirelessHART tornou-se o primeiro padrão de comunicação sem fio especificamente destinado à medição de processos industriais (por exemplo, sensores sem fio) e aplicações de controle. Baseia-se no protocolo de comunicação HART e usa o padrão IEEE 802.15.4, que opera na banda ISM 2,4 GHz. Em 2010 o protocolo recebeu a certificação da IEC com número IEC 62591.

Pode-se realizar a instalação de sensores WirelessHART em dispositivos HART cabeados tradicionalmente. Esses sensores *wireless* forneceriam informações de diagnóstico adicionais sobre equipamentos que não estavam disponíveis anteriormente em Sistemas de Controle Distribuídos instalados. Isso é mostrado na Figura 11. Uma das desvantagens apresentadas por este protocolo de comunicação é que ele é compatível apenas com outros dispositivos habilitados para HART.

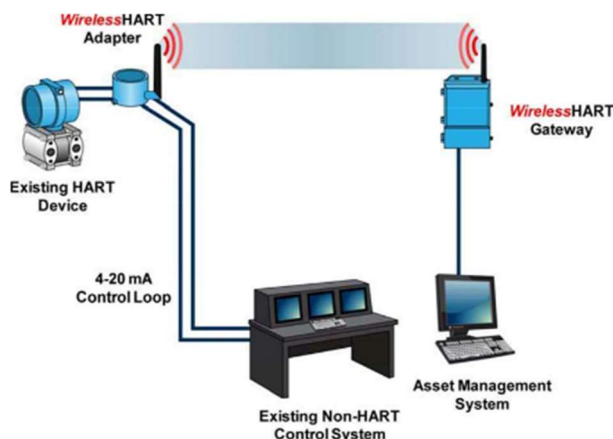


Figura 11: Dispositivo WirelessHART que fornece informações de diagnóstico adicionais

Como exemplo, a figura 12 apresenta um arranjo pela empresa Emerson, que utiliza o protocolo WirelessHART nas suas propostas de aplicação da tecnologia *wireless*.

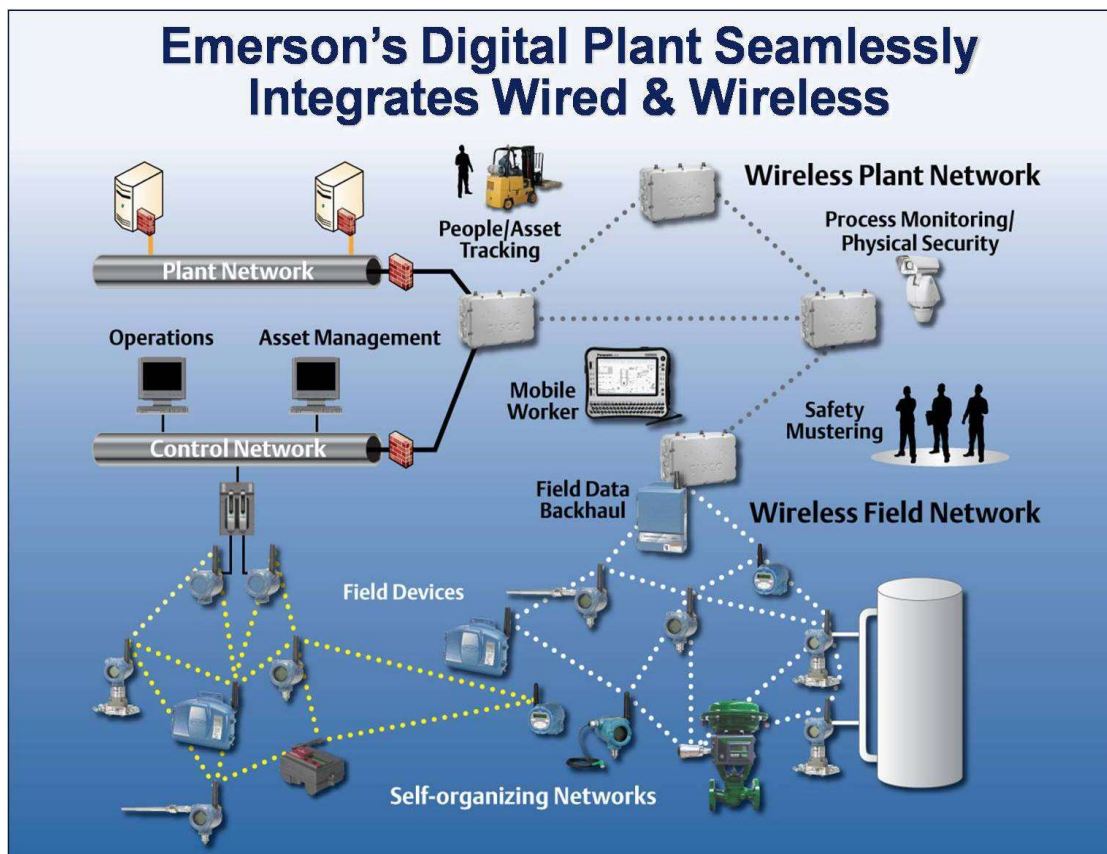


Figura 12 - Montagem típica de uma Emerson Smart Wireless (Emerson, 2019)

A Figura 13 apresenta uma comparação entre os protocolos proprietários e da norma IEEE [6].

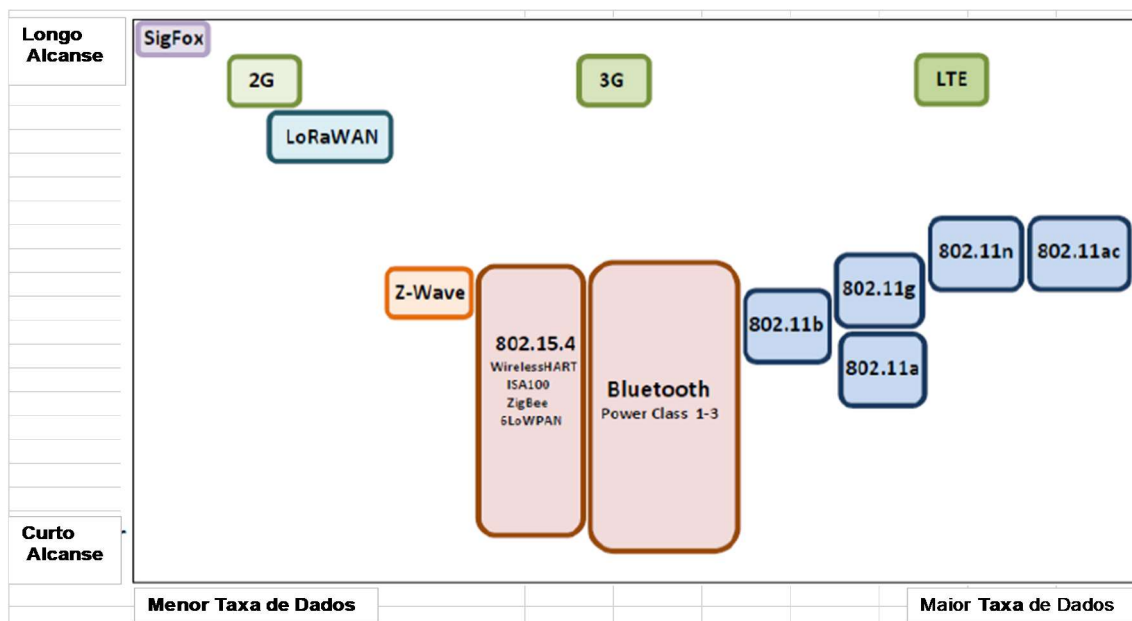


Figura 13 - Comparação entre os protocolos proprietários e da norma IEEE (EPRI, 2018)

A Tabela 4 apresenta uma comparação de desempenho dos principais protocolos em uso na indústria em geral, baseado na característica e requisitos da aplicação do projeto utilizando tecnologia *wireless* [1].

Tabela 4 - Wi-Fi, Bluetooth, and Zigbee Standards (EPRI, 2009)

Característica	IEEE 802.11b (Wi-Fi)	Bluetooth	Zigbee
Perfil de Alimentação	Horas	Dias	Anos
Complexidade	Muito complexo	Complexo	Simple
Nós / Master	32	7	64
Latência	Enumeração até 3 segundos	Enumeração até 10 segundos	Enumeração até 30 milissegundos
Alcance	100 metros	10 metros	70-300 metros
Expansão	Possível <i>Roaming</i>	Não	Simple
Taxa de Dados	11 Mbps	1 Mbps	250 Kbps
Segurança	Authentication Service Set ID (SSID)	64 bit, 128 bit	128 bit AES e Camadas de Aplicação definidos pelo usuário
Operabilidade com Multivendedores	Sim	Sim	Sim
Protocolo Aberto	Sim	Sim	Sim

Em um estudo realizado pelo site ControlGlobal.com em 2013 com mais de 150 leitores, mostrou a utilização de determinados protocolos wireless dentro da indústria, onde os padrões de comunicação utilizados são [12]:

Tabela 5 - Padrões de comunicação utilizados [12]

Wireless HART	31.6%
802.11b/g	28.6%
WiFi (802.11n)	9.2%
Proprietary protocol	9.2%
802.11a	5.1%
ZigBee (802.15.4)	1%

Os participantes têm intenção de utilizar a tecnologia wireless para:

Tabela 6 - Intenção de utilização de tecnologia wireless [12]

Monitoramento	59.7%
Controle	27.7%
Alertas e Alarmes	12.6%

De acordo com uma pesquisa realizada pela **On World**, mostrou que os usuários preferem uma topografia *mesh*. Isso favorece os protocolos WirelessHART e ISA100.11a.

2.3 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO DOS SINAIS DA TECNOLOGIA SEM FIO

A tecnologia *wireless* utiliza sinais de radiofrequência para a transmissão de dados entre seus equipamentos. Este tipo de transmissão é pouco sensível a interferências do meio e possui uma grande largura de banda passante, o que o caracteriza como o tipo de transmissão ideal para as redes sem fio.

Algumas técnicas de radiofrequência não são utilizadas pelos equipamentos *wireless*, devido ao fato de não serem adequados para a transmissão de dados ou possuir limitação bastante significativa no seu alcance por não conseguir atravessar objetos opacos, como a *narrow band* (sistema de rádio de banda estreita) e o infravermelho, respectivamente.

Neste contexto, a comunicação *wireless* se baseia em três tipos de tecnologia de transmissão de dados que são o Espalhamento Espectral por Salto de Frequências, do inglês *Frequency Hopping Spread Spectrum* – FHSS; o Espalhamento Espectral com

Sequenciamento Direto, do inglês *Direct Sequence Spread Spectrum* – DSSS; e a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM. As duas primeiras se baseiam na tecnologia de espalhamento de espectro. Já a última se baseia na utilização da largura de banda de um canal de frequência, dividindo-a em vários sub-canais para realizar a transmissão dos dados.

Os rádios utilizam o método de DSSS ou salto de canais FHSS para uma comunicação segura e confiável assim como comunicação sincronizada entre os dispositivos da rede utilizando *Time Division Multiple Access* – TDMA. É uma rede sem fio que aplica gerenciamento de energia eficaz usando baterias, energia solar e outras fontes de energia. Um dos principais produtos de sensor sem fio destinado a monitoramento de processos industriais baseado no padrão de comunicação

Vamos mostrar abaixo as três principais tecnologias aplicadas para modulação de sinais:

2.3.1 FHSS – ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SALTO DE FREQUÊNCIAS

- Usa uma portadora de banda estreita única
- Transmissor e receptor usam canal único para se conectarem
- Mudam (saltam) a frequência entre si (400ms)
- A comunicação é vista por um invasor como um ruído, dificultando a leitura
- Utiliza toda a banda, perde-se velocidade de transmissão
- Na *Frequency Hopping Spread Spectrum* - FHSS, através de um padrão conhecido pelo transmissor e pelo receptor, há a utilização de uma portadora de banda estreita que realiza a alteração da frequência, ou seja, baseia-se no salto de uma frequência para outra rapidamente. Assim, o transmissor e o receptor mantêm um único canal lógico quando estão sincronizados adequadamente. Mudando a frequência de maneira rápida, na ordem de 400 milissegundos para se saltar de uma frequência para outra, esta tecnologia se torna mais segura contra invasores, que encontram dificuldades para identificar o canal de transmissão dos dados. A transmissão de dados através dessa tecnologia é enxergada como um ruído de curta duração por receptores que não conseguem obter a sua codificação (Figura 14). Porém, a FHSS utiliza a banda de forma

inefcaz, pois por utilizar toda a banda para realizar o espalhamento espectral, acaba por perder velocidade de transmissão.

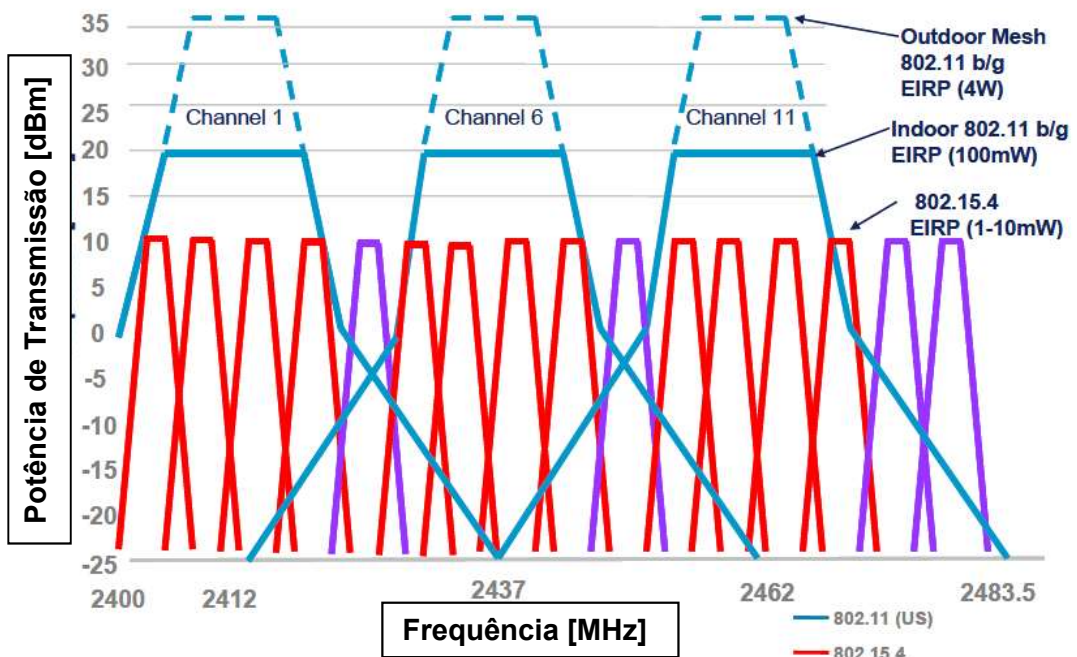


Figura 14 - *Frequency Hopping Spread Spectrum* – FHSS típico do WirelessHart [13]

2.3.2 DSSS – ESPALHAMENTO ESPECTRAL COM SEQUENCIAMENTO DIRETO

- Espalha a informaoo ao longo de sua faixa de frequência
- Usa codificaoo e decodificaoo (chipping code), uma funoo XOR de resultado 0= entrada iguais e 1= entradas diferentes
- Suporta taxa de dados variados;
- Resistentes da multi-rotas e interferências
- Muito sensível a sinais de ruído
- Número limitado de acesso a um mesmo canal
- O *Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS consiste em espalhar a informaoo ao longo da faixa de frequência. Para tanto, realiza uma funoo XOR (funoo lógica que tem como resultado zero, se as entradas forem iguais e um, se forem diferentes) do sinal de entrada com uma funoo código, chamada *chipping code*.

Esse novo sinal é então transmitido e deve ser decodificado na recepção, utilizando a mesma função código utilizada em sua criação.

- As vantagens da tecnologia DSSS é que esta suporta taxa de dados variadas, são resistentes a multi-rotas e à interferência. Contudo, como desvantagens, apresenta-se fraca a sinais de ruído e possui um número limitado de acessos a um mesmo canal.

2.3.3 OFDM – MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA

- Divide o sinal em diversas sub portadoras, cada um possui um trecho de informação
- Utiliza largura de banda maior que as outras
- Usa multiplexação por divisão de frequência
- Elevada eficiência do espectro do campo de comunicação
- Imunidade contra multi-rotas e filtragem de ruído simples
- Dificuldade de sincronismo das portadoras e sensibilidade a desvios de frequência
- Para aplicações simples
- Já a tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM, consiste na divisão do canal em diversas sub portadoras, realizando a transmissão destas sub portadoras paralelamente umas com as outras, sendo que cada uma possui um trecho da informação. Ela utiliza largura de banda maior que as outras tecnologias. Sendo assim, ela utiliza a técnica de transmissão de dados por multiplexação por divisão de frequência, que consiste na passagem por diversas frequências dos sinais que são enviados. Como vantagens, apresenta elevada eficiência espectral, imunidade contra multi-rotas e filtragem de ruído simples. Já suas desvantagens são a dificuldade de sincronismo das portadoras e a sensibilidade aos desvios de frequência.

A Figura 15 mostra um exemplo dos canais sobrepostos para vários protocolos sem fio de 2,4 GHz, incluindo Bluetooth, ZigBee e Wi-Fi, com a finalidade de usar técnicas para evitar interferência entre as frequências de transmissão [14].

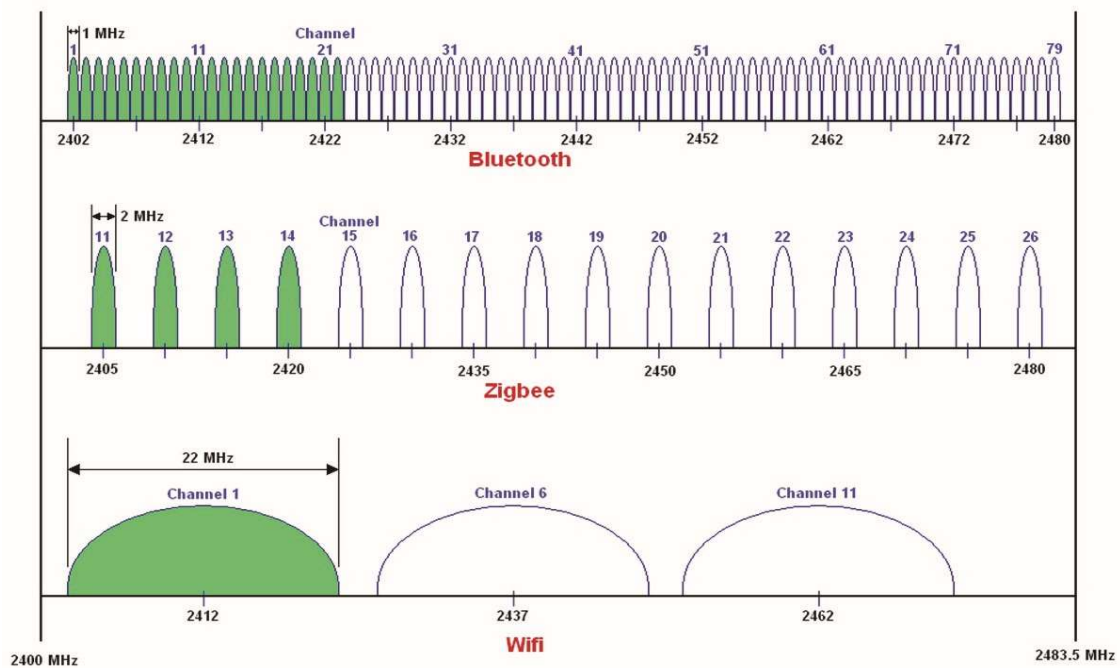


Figura 15 - Sobreposição de canais para protocolos de rede wireless de 2.4 GHz (AMS, 2012)

2.4 ESTRUTURA DE UMA REDE WIRELESS

Para implantação de uma rede de comunicação *wireless*, se faz necessária a análise de diversos componentes que interferem no funcionamento deste tipo de rede. Além do local de implantação, da análise da tecnologia a ser utilizada, do estudo sobre a segurança, dentre outros empecilhos que afetam a integridade das redes sem fio, há também a escolha correta dos equipamentos a serem utilizados para transmitir e receber os sinais dos dados que trafegarão pela rede, como os captadores de dados, as antenas e os adaptadores.

2.4.1 ANTENAS

A antena é um dos principais equipamentos utilizados para a comunicação das redes sem fio. Elas são utilizadas para captar e irradiar ondas eletromagnéticas, ou seja, se comparadas às redes cabeadas, as antenas são como os cabos de conexão de tais redes. Se não houver a instalação de uma antena em um projeto de rede *wireless*, os dispositivos sem fio geram sinais de radiofrequência com amplitude muito baixa, sendo impossível transmitir tais sinais.

Para decidir qual antena é apropriada para uma rede sem fio a ser implantada, devem-se analisar diversos fatores, como: área de cobertura, distância máxima em que se pode instalar determinada antena, localização da antena relativamente aos outros equipamentos da rede *wireless*. Estes fatores influenciam muito na escolha da antena. No caso da distância a ser coberta pela antena sempre se faz necessário que se escolha uma antena com capacidade maior que a necessária, para que esta não trabalhe com sua capacidade máxima, o que acarretará em perda de sinais.

Para as aplicações *wireless* há, basicamente, dois tipos de antenas: a omnidirecional e a direcional.

As antenas omnidirecionais são bastante aceitas para trabalharem em áreas amplas e em aplicações multiponto. Elas possuem alcance de 360 graus no plano horizontal e geralmente são usadas nas estações base, disponibilizando a instalação de estações remotas ao seu redor.

As antenas direcionais possuem a particularidade de concentrar o sinal em uma única direção. Normalmente utilizadas nas estações remotas, realizando a comunicação entre elas e uma ou mais estações base. Possuem seus sinais caracterizados por um alcance curto e amplo ou longo e estreito, devido à dependência entre estes dois fatores.

Portanto, o tipo de antena a ser utilizada deverá ser definido de acordo com a arquitetura de rede utilizada e sua função dentro dela. Em topologias como árvore e estrela é possível utilizar antenas omnidirecionais no *gateway* e antenas direcionais nos dispositivos, garantindo uma arquitetura com um menor consumo de energia e maior segurança.

2.4.1.1 TIPOS DE ANTENA DE TRANSMISSÃO

- **Omnidirecional:** O sinal é enviado em todas as direções
- **Direcional:** Feixe dirigido. O receptor e o emissor têm que estar alinhados



Figura 16 - Sinais de Antena Direcional e Omnidirecional

2.4.1.2 SISTEMAS DE ANTENA DISTRIBUÍDA

O EPRI, através de seu jornal da edição de julho/agosto de 2017, promoveu a divulgação da utilização de Sistemas de Antena Distribuída [15].

Historicamente, as usinas nucleares basearam-se em rádios portáteis convencionais para comunicações e em sensores com fio para dados. Agora, algumas plantas estão considerando a instalação de redes Wi-Fi. No entanto, a infraestrutura da planta é tão complexa e as paredes tão grossas que os sinais não transmitem facilmente, como mostra figura ilustrativa 17. Mesmo com múltiplos pontos de acesso, a intensidade do sinal degrada-se rapidamente. As plantas tipicamente têm pouca ou nenhuma cobertura celular.

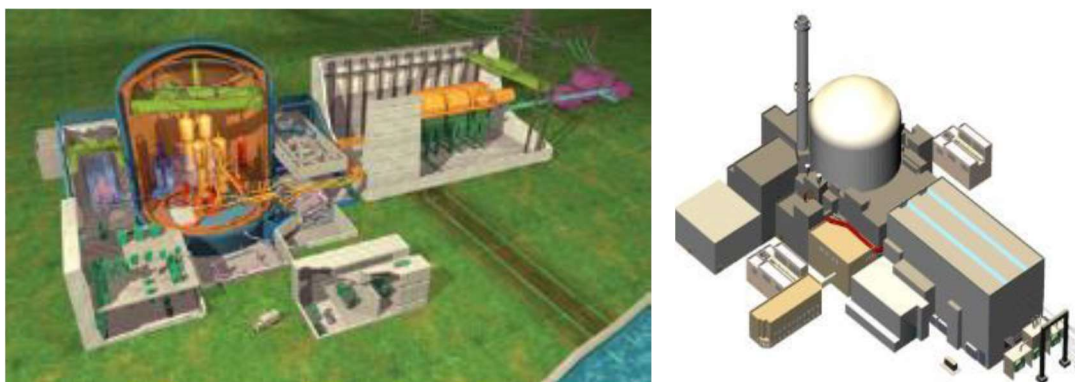


Figura 17 - Estrutura típica de uma Usina Nuclear Potência PWR (EPRI, IAEA, 2018)

O líder técnico sênior do EPRI, Nick Camilli, está investigando o uso de redes de desenvolvimento de celular de Evolução de Longo Termo (Long Term Evolution - LTE) e sistemas de antenas distribuídas para amplificar e distribuir sinais de radiofrequências. Tais sistemas podem ser uma solução sem fio econômica, como demonstrado pela sua aplicação bem-sucedida em grandes hotéis, metrô e túneis.

"A tecnologia de antena distribuída traz uma plataforma sem fio flexível para suportar comunicações de voz, monitoramento de equipamentos e outras novas tecnologias que a indústria está adotando", disse Camilli. "Ele pode permitir um processo de execução de trabalho mais rápido e eficiente e aumentar a mobilidade dos trabalhadores de manutenção usando tablets portáteis e outros dispositivos digitais".

Os cabos de radiação podem aumentar os sistemas de antenas distribuídas. Estes cabos coaxiais ranhurados se estendem até várias centenas de metros e operam como uma única antena, permitindo que os sinais se propagem ao longo de seu

comprimento. Eles podem ser enrolados em torno do equipamento e em vazios e "áreas de sombra" onde os sinais sem fio tradicionais não podem alcançar.

"As usinas de potência provavelmente usarão uma combinação de antenas de ponto-fonte e cabos de radiação, dependendo dos requisitos de cobertura e estruturas da construção", disse Camilli.

Em relação ao Wi-Fi convencional, os sistemas de antenas distribuídas podem operar em frequências mais baixas, que se propagam mais amplamente e penetram mais extensivamente. Isto é fundamental nas usinas de energia nuclear, com paredes com 60 a 90 centímetros de espessura e cheias de vergalhão. "Nós estamos analisando as frequências na faixa de 700-800 megahertz, bem abaixo dos 2.400 megahertz do Wi-Fi convencional", disse Camilli. "Nossos testes provaram que esses sistemas podem produzir cobertura 2-3 vezes mais forte que o Wi-Fi". Veja figura 18 ilustrativa do teste da antena DAS pelo EPRI.

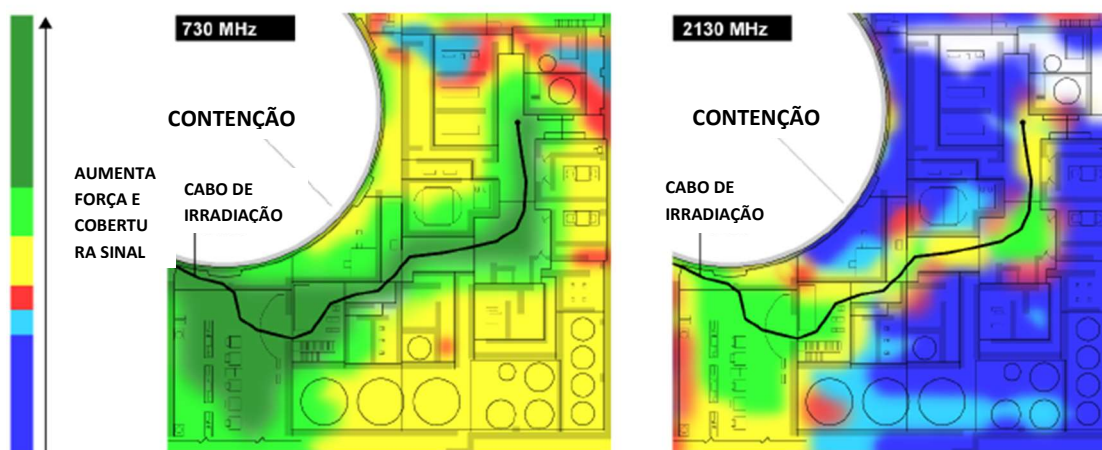


Figura 18 - Sistema de Antena Distribuída em teste pelo EPRI (EPRI, 2017)

Camilli e sua equipe examinaram a viabilidade de um sistema de antenas distribuídas em duas usinas nucleares que estão sendo descomissionadas.

"Concentramos nossos testes no prédio da contenção e nos edifícios auxiliares", disse Camilli. "Porque usamos frequências mais baixas, conseguimos gerar mais cobertura com menos componentes. Ambas as demonstrações piloto provaram que os sistemas de antenas distribuídas possuem flexibilidade e confiabilidade para atender às necessidades das instalações nucleares com diferentes projetos e configurações de plantas " [15].

A flexibilidade do Sistema de Antenas Distribuídas - SAD (Distributed Antenna System – DAS) permite que rádios bidirecionais, dispositivos celulares (incluindo tablets), sensores sem fio e outros dispositivos sem fio operem a partir de uma plataforma, potencialmente economizando milhões de dólares para as fábricas. Como um DAS é independente de frequência e protocolo sem fio, um design modular permite uma plataforma que pode crescer com necessidades futuras com aprimoramentos mínimos de hardware [16]

"A maioria das pessoas associa o DAS a telefones celulares, mas essa é apenas uma peça do quebra-cabeça", disse Nick Camilli, líder técnico sênior do EPRI. "Um DAS pode suportar espectro de frequências licenciado e não licenciado, o que é um divisor de águas para a indústria." [16]

Cabos de irradiação ou "coaxial com vazamento" são usados em conjunto com um Sistema de Antenas Distribuídas (SAD) para propiciar a propagação de sinais ao longo de todo o comprimento do cabo, em oposição a uma antena normal que é um irradiador de ponto fixo. Os cabos irradiadores têm um histórico de sucesso comprovado em ambientes adversos e são comumente usados em túneis de minas e de trânsito para fornecer dados e comunicações tanto para operações e celulares. Em uma usina nuclear, onde a maioria das áreas não são contínuas e as paredes são tipicamente grossas e feitas de concreto, um cabo pode ser roteado em torno de cantos e em espaços restritos, onde a propagação normal de ondas seria prejudicada. Num sistema de antena tradicional a cobertura seria prejudicada, pois os sinais seriam irradiados de um único ponto e seriam significativamente atenuados pelas estruturas vizinhas. A figura 19 apresenta tipos de cabos de irradiação usados como antenas.

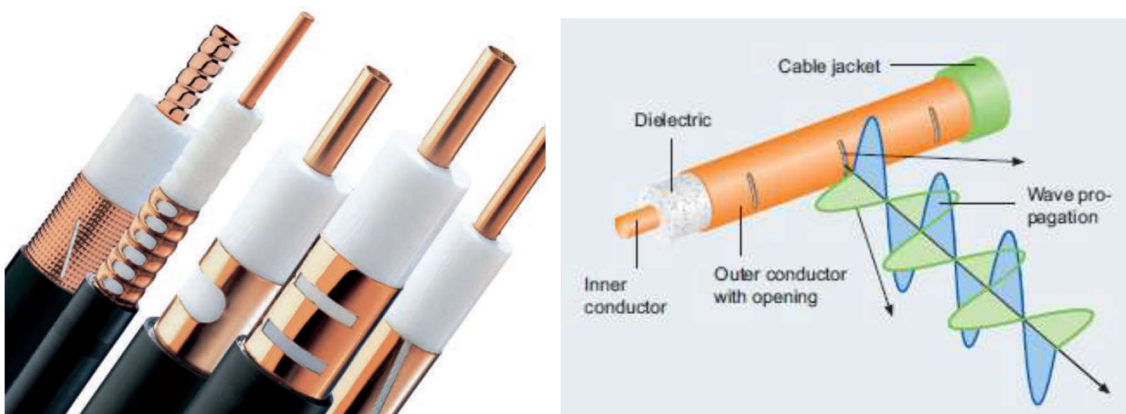


Figura 19: Tipos de Cabos de irradiação modelo RADIAFLEX (RFS, 2015)

De uma forma geral, a transmissão Wi-Fi, a transmissão por DAS ou outro protocolo pode ser escolhido, incluindo a combinação deles, de tal forma a satisfazer os requisitos e características do projeto da instalação da planta.

2.5 TOPOLOGIAS DAS REDES WIRELESS

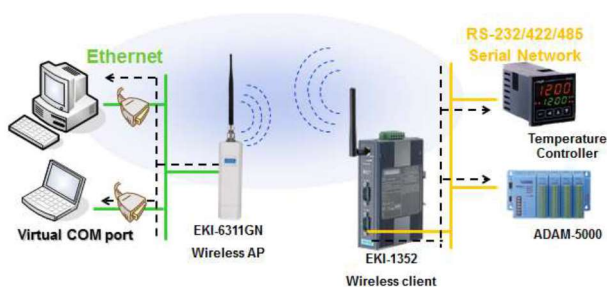
Conforme as topologias há uma variedade na distribuição dos equipamentos que fazem parte das redes *wireless*, definindo as arquiteturas das redes. Estes equipamentos pertencentes à rede são os dispositivos e os portais de acesso (*gateways*). Estes últimos são os chamados pontos de acessos que possuem as funções de gerenciar o tráfego de rede e sua segurança, além de estabelecer o acesso dos dispositivos à rede, com funções de sensores-transdutores, que possuem uma unidade de processamento digital e capacidade de transmissão de sinais.

Vale lembrar de que as topologias das redes *wireless* não são definidas pela estrutura física de conexão dos equipamentos, mas sim pela conexão lógica aos quais são submetidos. Neste caso, as topologias podem ser divididas por:

2.5.1 PONTO A PONTO

Essa topologia é caracterizada pela conexão direta entre dispositivos individuais. Todas as outras topologias se baseiam no ponto a ponto, sendo ramificações e ampliações desta topologia (Figura 20).

Figura 20 - Exemplo de Topologia ponto a ponto (Advantech, 2013)



2.5.2 ESTRELA

Estrela se caracteriza por ser uma topologia de conexão multiponto, na qual os dispositivos se conectam somente com o sistema de controle. Possui certas vantagens por ser uma topologia de fácil manutenção, implementação e configuração, além de suportar a não comunicação de certo dispositivo com o provedor de acesso, fazendo com que o sistema não interrompa o seu funcionamento. Porém, um dos pontos negativos é que se o provedor de acesso parar de comunicar haverá a perda de toda a rede e outro ponto questionável é que essa topologia não suporta uma grande quantidade de equipamentos conectados (Figura 21).

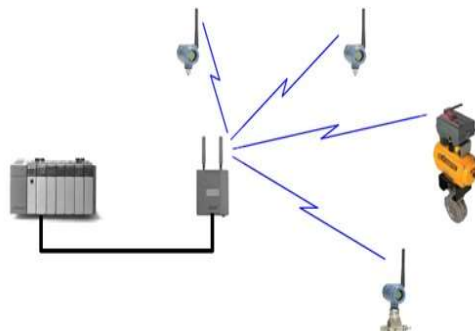


Figura 21 - Exemplo de Topologia estrela (Emerson, 2015)

2.5.3 ÁRVORE

Essa topologia possui a mesma forma de comunicação da topologia estrela. Porém se caracteriza por possuir uma maior cobertura e não ter problemas de perda da rede inteira caso ocorra perda de um ponto de acesso. Mesmo assim, suas desvantagens são: custo elevado caso haja uma expansão da rede e diminuição da taxa de transferência entre os equipamentos da rede caso haja um aumento no número de ramificações (Figura 22).

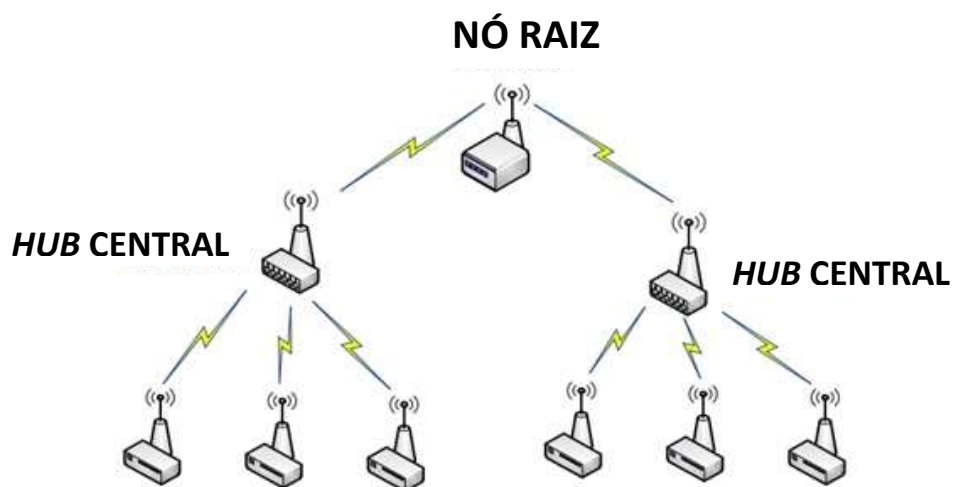


Figura 22 - Exemplo de Topologia em árvore.

2.5.4 MALHA (MESH)

Essa topologia de rede wireless em forma de malha, mais conhecida como *mesh* (em inglês), são caracterizadas pelos seus dispositivos possuírem a capacidade de se comunicar diretamente com os dispositivos adjacentes, sem a necessidade a intervenção dos comandos dados pelo ponto de acesso. Esta topologia de rede possui algumas vantagens como a redução do custo de instalação, já que este custo se

baseará, praticamente, apenas no valor do novo dispositivo a ser acrescentado na rede e, por possuir a função de auto roteamento, ou seja, ser um sistema redundante, esta rede é de alta confiabilidade. Seus pontos negativos são: devido à função de auto roteamento, há um aumento do consumo de energia e do tráfego de rede e, também, pode correr o aumento do tempo de latência proporcionado pelo caminho encontrado para o novo roteamento (Figura 23).



Figura 23 - Exemplo de topologia mesh (Emerson, 2015)

2.5.5 HÍBRIDAS

As topologias híbridas combinam instalações de redes sem fio com redes cabeadas. Elas utilizam qualquer uma das topologias descritas acima, sempre buscando utilizar as vantagens que cada uma pode proporcionar para um bom ambiente de rede. A topologia híbrida é a mais usada no ambiente industrial, devido ao fato de já haver a instalação de redes cabeadas nestes ambientes e, com isso, se ter a instalação parcial das redes *wireless*.

2.6 SEGURANÇA DE DADOS NA REDE WIRELESS

Assim como nas redes cabeadas tradicionais, é fundamental o investimento em SEGURANÇA no projeto de uma rede wireless. Esse sistema de segurança deve permitir a privacidade, a confiabilidade, a autenticidade e a disponibilidade dos dados. Diversas metodologias são empregadas para evitar a interrupção dos dados por qualquer motivo, incluindo a perda de alimentação elétrica. Técnicas como modulação de sinal, sincronização de dados, criptografia de dados, chaves de segurança etc. são empregadas para evitar interferências eletromagnéticas com outros equipamentos, sabotagem de dados por invasores, introdução de vírus etc.

A privacidade deve manter a rede livre de acessos não autorizados, tanto internos quanto externos. Bloqueio de acessos à rede geralmente são atribuídos a dispositivos chamados *firewalls*. Os *firewalls* bloqueiam o acesso a endereços IP e portas de comunicação. Além disso, eles podem autenticar usuários, exigindo uma chave de segurança/*password*.

A confiabilidade de uma rede ou sistema significa manter os dados disponíveis, atualizados e precisos, alarmando quando alguma anormalidade é identificada ou executando alguma ação para permitir a continuidade do processo ou levando a uma condição segura, que pode incluir o desligamento parcial ou total do equipamento, componente, sistema ou planta.

A utilização de rádios com maior poder de transmissão para evitar a perda de sinal requer uma maior potência elétrica. No entanto, a possibilidade de aumentar a interferência eletromagnética deve ser considerada, assim como o consumo alto de energia levando a impossibilitar uma solução com uso de baterias de longa duração.

A alimentação elétrica dos dispositivos das redes wireless industriais, além de ser um fator técnico necessário, também tem sua importância na segurança da rede, uma vez que uma perda de suprimento pode impedir o funcionamento da mesma. Um projeto intrinsecamente seguro, com redundâncias, alimentação diversificada (inversores, baterias, células capacitivas etc.), proteção ambiental e proteção contra desligamentos indevidos por falha humana ou sabotagem deve ser considerado.

Por exemplo no protocolo SP100.11a, a sincronização dos dados utiliza tempo variável TDMA ou tempo fixo de 10ms. Em relação ao algoritmo de segurança utiliza criptografia de chaves simétricas AES-128 ou 256 bits ou chaves assimétricas pública/privada.

No protocolo Wi-Fi e padrões IEEE 802.1X temos as seguintes técnicas de segurança:

Filtro MAC: Permissão/ Bloqueio pelos endereços físicos (MAC – Media Access Control) dos equipamentos da rede sem fio.

WEP –Wired Equivalent Privacy: O WEP é um método de segurança de rede mais antigo que ainda está disponível por suportar dispositivos antigos, mas que já não é recomendado. Ao habilitar o WEP, você configura uma chave de segurança de rede. Essa chave criptografa as informações que um computador envia para outro

computador pela rede. No entanto, a segurança do WEP é relativamente fácil de violar. 40, 64, 128, 152 e 256 bits

WPA e WPA2–Wireless Protected Access: O WPA foi criado para ser usado com um servidor de autenticação 802.1X, que distribui chaves diferentes para cada usuário. Isso é conhecido como WPA Enterprise ou WPA2-Enterprise. Ele também pode ser usado no modo de chave pré compartilhada (PSK), onde cada usuário recebe a mesma senha. Isso é conhecido como WPA-Personal ou WPA2-Personal.

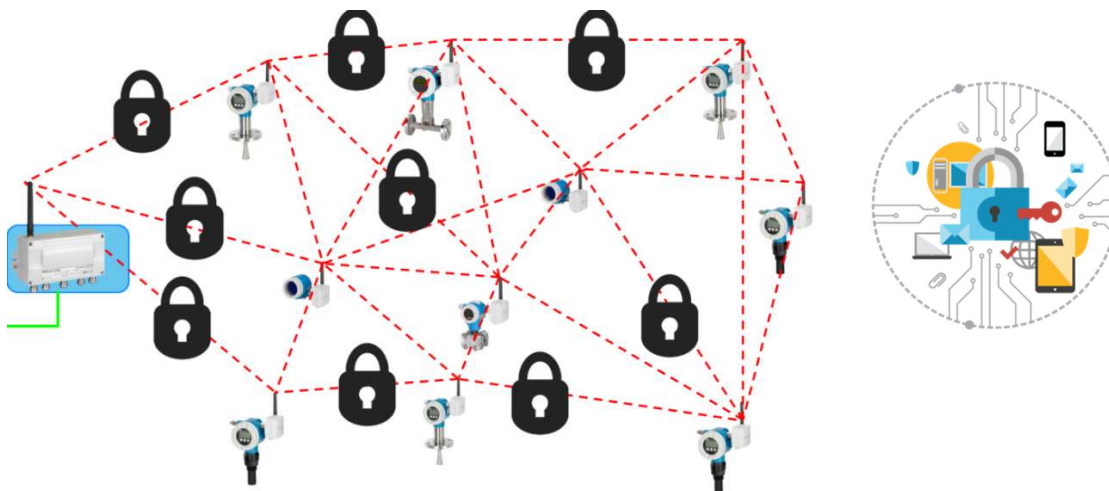


Figura 24 - Dados são criptografados para segurança da informação no protocolo WirelessHart [13]

2.6.1 SEGURANÇA CIBERNÉTICA PARA USINAS NUCLEARES

Os sistemas críticos de segurança em instalações de energia nuclear são isolados da internet. Eles são ainda mais protegidos por planos de segurança cibernética (*cyber security*) e segurança física exigidos pelos órgãos reguladores. Além disso, as usinas de energia nuclear são projetadas para desligar de forma segura caso ocorra alguma perturbação no seu sistema de rede elétrica. Assim, as usinas nucleares estão protegidas contra ameaças digitais por camada após camada de medidas de segurança (defesa em profundidade).

A indústria de energia nuclear vem se preocupando com a segurança cibernética e os órgãos reguladores, principalmente a NRC após 11 de setembro e 2001, demandaram que as empresas que operam usinas nucleares aumentassem a segurança em várias áreas. Nos Estados Unidos da América, toda empresa que opera plantas de energia nuclear tem um programa de segurança cibernética aprovado pelo NRC [17].

Primeira linha de defesa empregada nas atuais usinas nucleares é o ISOLAMENTO. Os sistemas críticos de segurança em instalações de energia nuclear estão isolados da internet. Eles não têm acesso direto à internet, nem têm acesso indireto porque não estão conectados às redes internas das instalações. Esses sistemas usam sistemas de controle de chaves isolados e “aberturas de ar” (air gap), que não requerem rede interna ou conectividade à Internet, ou dispositivos de isolamento robustos baseados em hardware que separam o sistema de controle dos computadores do escritório avançado, tornando-os inúteis para atacar sistemas essenciais [17].

Além da proteção oferecida pelo isolamento, os ativos digitais das usinas nucleares são ainda mais protegidos por planos de segurança cibernética e segurança física requeridas.

As mídias e equipamentos portáteis, tais como pen-drives, discos compactos e laptops usados para interface com os equipamentos da planta, devem ter ações implementadas para minimizar a ameaça cibernética. Os indivíduos que trabalham com equipamentos de instalações digitais estão sujeitos a uma maior seleção de segurança, treinamento de segurança cibernética e observação comportamental [17].

A figura 25 apresenta uma rede wireless onde as vulnerabilidades estão aparentes. Ações de hardware, software, treinamentos e de controles gerenciais devem ser implementados para se permitir somente acessos seguros a rede de comunicação.



Figura 25 - Exemplos de Vulnerabilidades de Segurança numa Rede Wireless (EPRI, 2009)

2.7 INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS E POR RÁDIO FREQUÊNCIA (EMI / RFI)

Todos os dispositivos eletrônicos emitem ondas magnéticas durante a operação. Essas emissões são resultado da atividade elétrica. O distúrbio de um dispositivo eletrônico provocados por estas emissões ou por atividade eletromagnética natural (por exemplo, raio) é denominada Interferência Eletromagnética (EMI). A Interferência de Radiofrequência (RFI) é o efeito de distúrbio específico da energia elétrica na faixa de frequência de rádio (maior que 30 kHz). A EMI pode ser propagada por emissões irradiadas ou emissões conduzidas ao longo de qualquer cabo dentro ou fora do sistema [1].

Um exemplo dos efeitos potenciais de EMI / RFI está ilustrado na Figura 26. O esquema mostra a mudança normal de estado induzida por uma transição de tensão em comparação com o que envolve uma forma falsa devido ao ruído induzido por EMI / RFI. Isso ilustra o potencial de EMI / RFI de se casar com o sinal ou linha de controle e ser mal interpretado como um correto formato, resultando em uma mudança de estado não intencional [1].

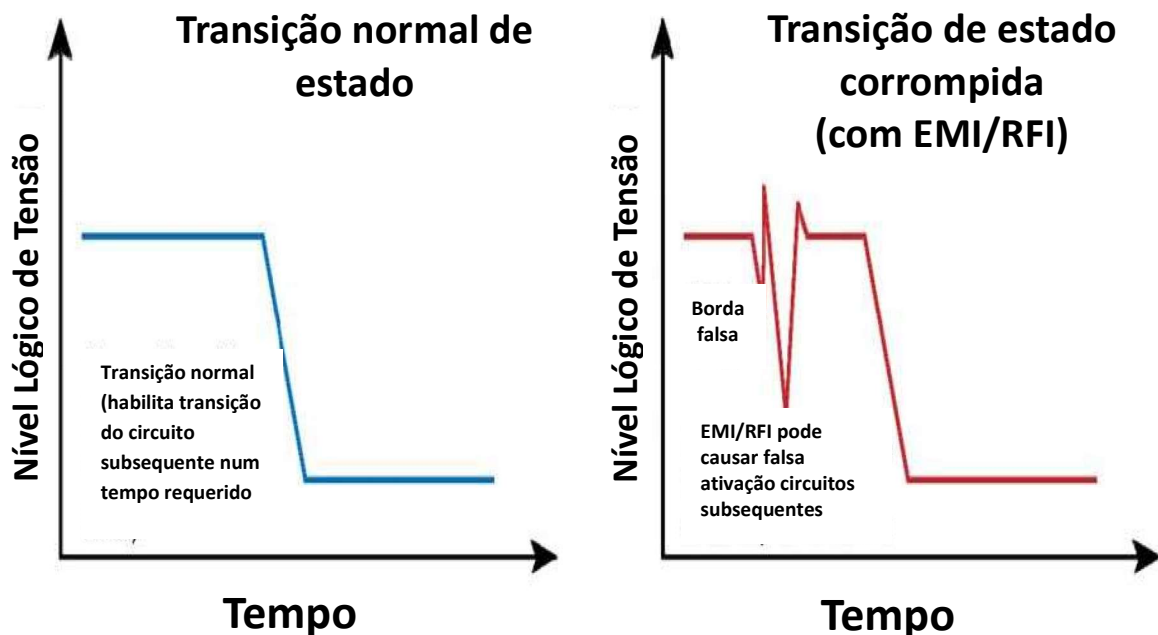


Figura 26 - Ilustração do falso acionamento do circuito digital pelo ruído eletromagnético (EPRI, 2009)

Por exemplo, a interferência resultante de dois dispositivos sem fio transmitindo dados ao mesmo tempo pode ser parcialmente mitigada por meio de seleção de canal, técnicas de espalhamento espectral e monitoramento de canal. Atributos de transmissão sem fio, como modulação, espalhamento espectral (que evita interferências

distribuindo sinais em uma ampla gama de frequências), acesso a canais e protocolos (Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, Wireless-HART) permitem que sinais sem fio mantenham sua integridade acima de distâncias enquanto coexistem nas mesmas frequências e regiões. [2].

2.7.1 EMI / RFI EM USINAS NUCLEARES

No ambiente da usina nuclear, existem inúmeras fontes de EMI / RFI, como inversores, motores, relés e assim por diante. Os dispositivos conectados a energia ac ou dc dentro da planta também são suscetíveis a EMI, que é conduzida através de cabos de alimentação. O mesmo é verdadeiro para linhas de comunicação de dados. Além disso, o aumento do uso da tecnologia digital na indústria nuclear levanta a preocupação com a Compatibilidade Eletromagnética (EMC), por causa das altas taxas de clock dos microprocessadores e dos baixos níveis de tensão de lógica utilizados, podendo aumentar o potencial de distúrbios por EMI / RFI. Da mesma forma, a introdução da tecnologia sem fio no ambiente das usinas nucleares provavelmente aumentará as emissões eletromagnéticas. Portanto, antes da implementação de qualquer novo sistema digital, incluindo um sistema sem fio, recomenda-se que seja realizado um levantamento do site de emissões para confirmar o EMC (Compatibilidade Eletromagnética) dos sistemas e / ou dispositivos no ambiente da planta [1].

O EMC é definido como qualquer sistema que satisfaça os três critérios a seguir:

- Não causa interferência com outros sistemas.
- Não é suscetível a emissões de outros sistemas.
- Não causa interferência consigo mesmo.

Um esquema que ilustra o EMI potencial em relação aos critérios anteriores que envolvem dispositivos sem fio é mostrado nas Figuras 27a, 27b e 27c, respectivamente. A Figura 27a mostra o potencial de dispositivos sem fio recentemente instalados capaz de introduzir emissões de rádio que possam ser problemáticas para os equipamentos existentes da planta. Por outro lado, como mostrado na Figura 27b, o equipamento da planta pode ser tão facilmente a fonte de emissões que interferem na transmissão de dispositivos sensores sem fio. Finalmente, embora improvável, dependendo da colocação do dispositivo sem fio, é possível que ele possa causar interferência em si mesmo, como mostrado na figura 27c. [1].

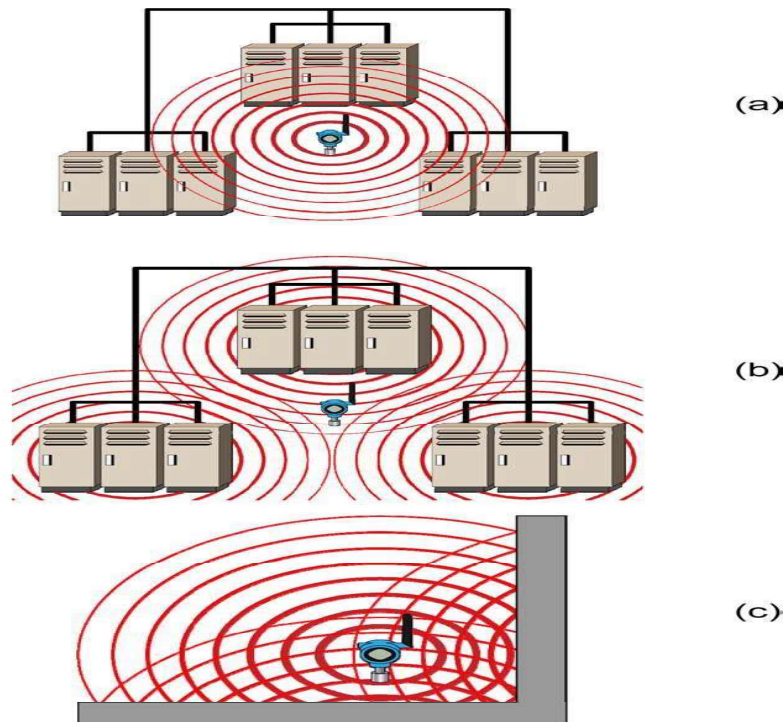


Figura 27 - Efeitos de EMI / RFI em dispositivos sem fio (EPRI, 2009)

A meta é garantir que a implantação de equipamentos de tecnologia sem fio numa planta nuclear não causará interferência com os equipamentos existentes da usina e vice-versa. A maioria das usinas nucleares em operação foram construídas há mais de 30 anos sem a preocupação de qualificação de seus equipamentos por interferências eletromagnéticas e de radiofrequência. Após a construção, algumas usinas começaram a utilizar rádios de intercomunicação de alta potência, apresentando diversas interferências, causando a restrição no uso desses equipamentos no interior das plantas. De uma maneira geral, adotou-se uma regra que dispositivos sem fio não poderiam ser utilizados dentro de uma área de 4,5 metros em torno dos equipamentos sensíveis (área de exclusão).

Sendo muito conservativo na determinação das zonas de exclusão, pode limitar drasticamente o uso de dispositivos sem fio em muitas áreas da usina. Importante citar que se deve testar a coexistência dos dispositivos *wireless* que serão implantados na usina nuclear, quanto a compatibilidade eletromagnética.

Para abordar as preocupações de EMI / RFI a partir de dispositivos sem fio portáteis e fixos dentro de usinas nucleares, a NRC forneceu diretrizes para estabelecer zonas de exclusão para proibir a ativação de emissores portáteis de EMI / RFI (por exemplo, máquinas de soldar e transmissores) em áreas onde existe equipamento de Instrumentação e Controle (I&C) relacionado a segurança. Uma zona de exclusão é a

distância mínima permitida entre um sistema de Instrumentação e Controle sensível e fontes de EMI / RFI. O tamanho de cada zona de exclusão depende das emissões de campo elétrico permitidas dentro de uma determinada área.

O guia mais recente para estabelecer a distância mínima da zona de exclusão está contido no documento do EPRI “Guidelines for Electromagnetic Compatibility Testing of Power Plant Equipment, Revision 4 (EPRI Technical Report TR-102323-R4, 2013) [18], que define a equação (1) a seguir:

$$V_d = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} \quad (1)$$

Onde,

P_t = potência de saída do dispositivo transmissor em Watts

G_t = ganho da antena do dispositivo transmissor (sem dimensões) e

V_d = campo de força do dispositivo emissor de EMI / RFI (em volts / metro) a uma determinada distância.

d = distância do dispositivo transmissor

Pelo guia do EPRI TR-102323 Revision 4, a emissão máxima do campo elétrico de um equipamento de uma usina de potência nuclear é de 132 dB μ V/m or 4 V/m. A equação (1) acima é usada para calcular a distância na qual o campo elétrico do dispositivo é igual a 4 V/m, para os valores dados de P_t e G_t dos dispositivos como potência irradiada efetiva ou potência irradiada isotrópica efetiva. O valor de campo elétrico de 4 V/m é escolhido porque equivale a 8 dB abaixo do nível de 10 V/m usado no teste de imunidade irradiado pelo uso dos documentos MIL-STD RS103 ou International Electrotechnical Commission (IEC) 61000-4-3 para qualificar um novo equipamento da planta a campos elétricos [19].

É importante observar que, ao se instalar dispositivos sem fio, o uso de baixa potência resultará em zonas de exclusão menores e, finalmente, maior flexibilidade no sistema sem fio. A figura 28 apresenta as potências típicas usadas nos protocolos e em alguns equipamentos com tecnologia *wireless*. [21]

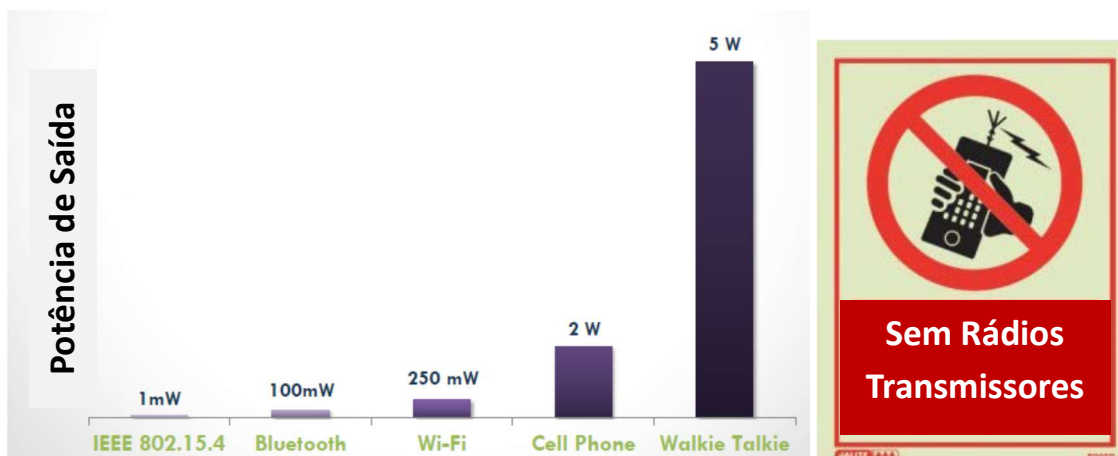


Figura 28 – Potência de Saída de protocolos e dispositivos *wireless* (AMS, 2015)

A tabela 7 apresenta exemplos de zonas de exclusão calculadas para dispositivos *wireless* encontrados comumente numa usina nuclear americana [20].

Tabela 7 - Exemplos de Distâncias de Zonas de Exclusão em uma usina nuclear (AMS, 2018)

Dispositivo <i>Wireless</i>	Distância (metros)
<i>iPad - Tablet</i>	2,44
Telefone Celular	2,74
Computador <i>Laptop</i>	0,91
Dosímetro <i>Wireless</i>	0,30
Sensor de Vibração <i>Wireless</i>	0,61
<i>Walkie Talkie</i>	3,96

Cada planta deve medir ou confirmar as zonas de exclusão de compatibilidade eletromagnética conforme guias do EPRI [18], assim como analisar o campo de cobertura de RF para implantação de uma rede sem fio;

A NRC estabeleceu diretrizes através do Regulatory Guide (RG -1.180) para abordar os efeitos da EMI / RFI em sistemas de I&C relacionados à segurança em usinas nucleares. O guia recomenda que, sempre que possível, as práticas de EMC aplicadas aos sistemas de I&C não relacionados à segurança sejam as mesmas que as aplicadas aos sistemas de I&C relacionados à segurança. Este guia também se aplica à instalação de dispositivos sem fio em uma usina de energia nuclear.

NRC RG-1.180 Revision 2 endossa os métodos do Padrão Militar (MIL-STD) - 461E, do Guia do EPRI “*Guidelines for Electromagnetic Interference Testing in Power Plants, Revision 4 (EPRI report TR-102323-R4, dezembro de 2014)*” e o padrão IEC

61000 para o teste de emissões e susceptibilidade a EMI / RFI. O novo padrão IEC 62003 encontra-se em revisão.

O guia mais atual contido no documento do EPRI TR-102323-Revision 4 define os limites para emissões de EMI / RFI e níveis de susceptibilidade para estabelecer diretrizes EMC para o setor de energia nuclear. Os limites no relatório foram desenvolvidos com base em padrões existentes e dados empíricos coletados de várias usinas nucleares operacionais. O resultado é um conjunto de emissões de EMI / RFI genéricas e níveis de susceptibilidade, juntamente com a identificação de fontes de emissões em usinas de energia nuclear.

O padrão militar MIL-STD-461E contém métodos para emissões de EMI / RFI e testes de susceptibilidade para uma variedade de frequências e ambientes. A IEC 61000 define envelopes genéricos e limites para emissões de EMI / RFI e testes de susceptibilidade.

Na figura 29 são apresentadas algumas fontes de interferência Eletromagnética e por Radiofrequência numa instalação industrial [22].

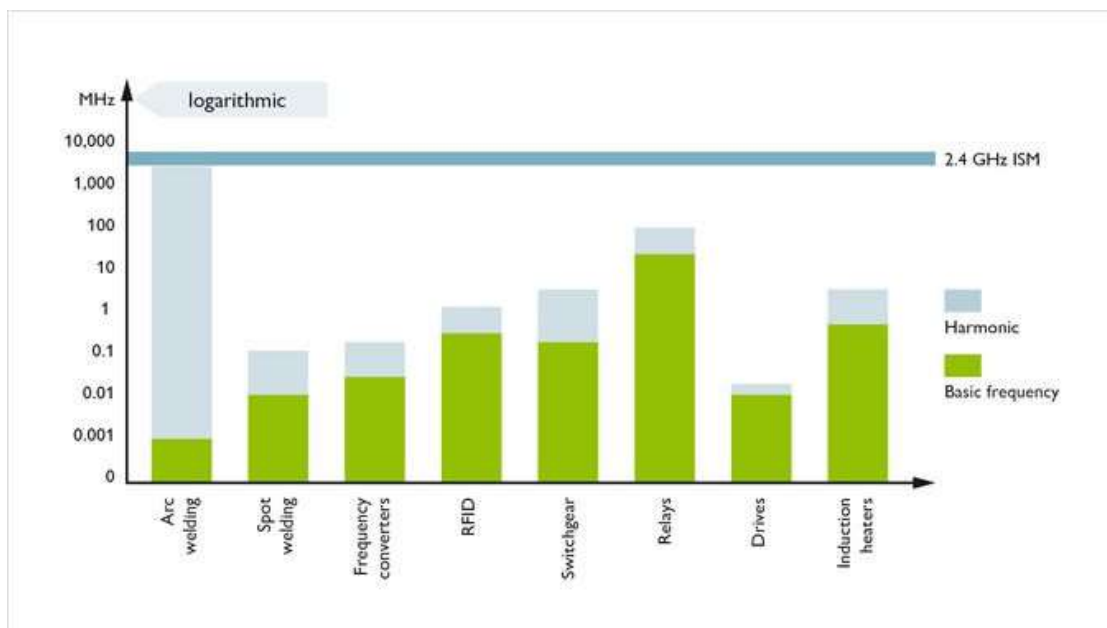


Figura 29 - Espectro de fontes de interferência Eletromagnética e por Radiofrequência numa instalação industrial. (PHOENIX, 2015)

A figura 30 apresenta um esquema para realizar uma avaliação de interferências eletromagnéticas e por radiofrequência, montando um transmissor com antena, um receptor de EMI com antena, um analisador de espectro e outros componentes que podem coexistir numa instalação nuclear com uso de tecnologia wireless [1].

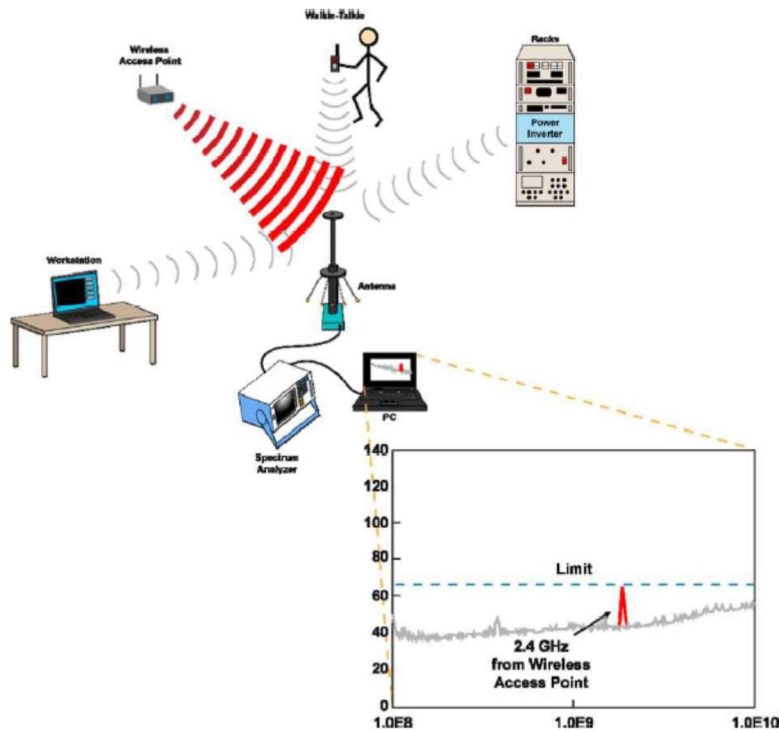


Figura 30 - Esquemático de uma montagem de teste para pesquisa de emissão espectral (EPRI, 2009)

Num dos testes de interferência eletromagnética e de radiofrequência realizados pela empresa AMS com equipamentos de uma Usina Nuclear, mostrou que um transmissor diferencial de pressão Barton 764 era sensibilizado pelo sinal *wireless* para frequências mais baixas, maior potência de campo e em curtas distâncias [12]. No entanto, blindagens podem ser elaboradas para permitir o uso da tecnologia *wireless* sem afetar estes equipamentos sensíveis, caso não se possa se distanciar destes.

Existe um projeto em andamento de Sistema de Rádio Cognitivo pela empresa AMS capaz de gerar sinais wireless, tais como Wi-Fi, Bluetooth and LTE, para verificar a imunidade dos equipamentos instalados aos sinais de interferências. Tal programa está em andamento na Central Nuclear Nine Mile Point (Estados Unidos das Américas) para implantação de tecnologia *wireless* em toda a planta. É importante frisar que nos testes realizados, ficou evidente uma maior vulnerabilidade dos equipamentos da planta para frequências baixas de transmissão, tais como 450, 700 e 900 MHz, enquanto que para bandas de altas frequências, tais como as usadas para Wi-Fi e Bluetooth (por exemplo 2.4 e 5 GHz), era menos vulnerável. A figura 31 representa de forma genérica o resultado citado [23].

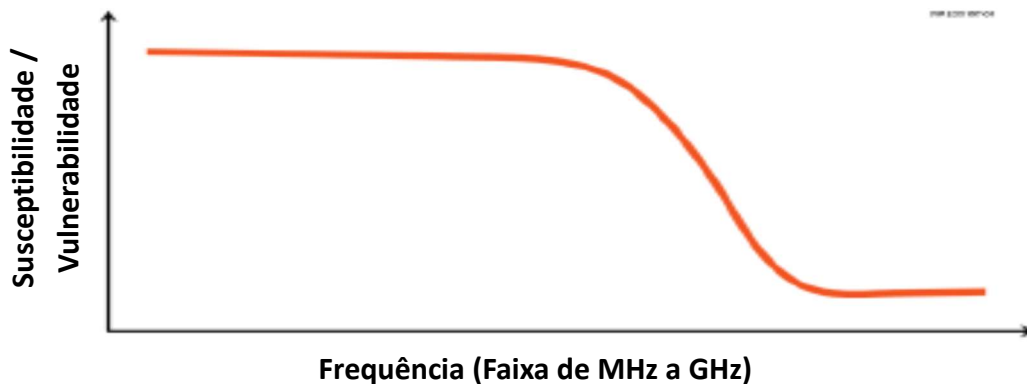


Figura 31 - Representação de Vulnerabilidade do Equipamento da Usina versus frequência do Sinal *Wireless* (AMS, 2018)

A figura 32 mostra a Influência da frequência na Interferência Eletromagnética e de Radiofrequência pelos diversos dispositivos *wireless* em uso nas usinas nucleares ou indústrias de uma forma geral [21].

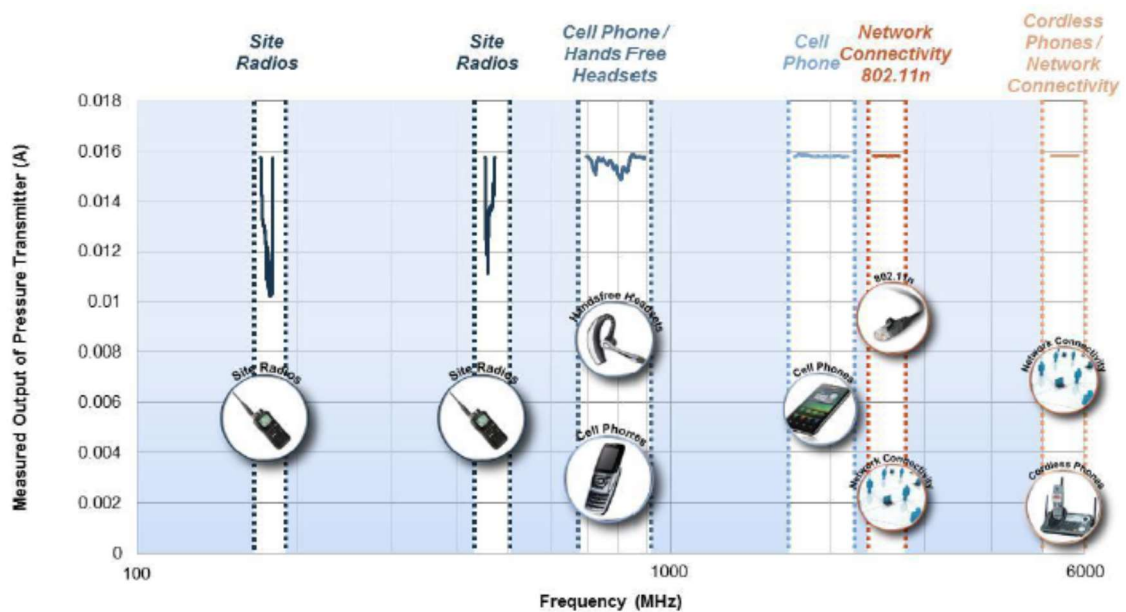


Figura 32 - Influência da frequência na Interferência de EMI e RF (AMS, 2013)

Na instalação de rede wireless é comum se culpar a Interferência Eletromagnética de uma forma genérica como responsável pela qualidade do sinal ou pelos problemas observados no sistema. No entanto, outros fatores deverão ser avaliados para evitar o EMI, tais como Blindagem, Aterramento, Separação de Cabos, Separação de Equipamentos, Zonas de Exclusão, Filtragem, Tipo de Cabos, Supressor de Surto, terminais soltos etc. A figura 33 apresenta uma capa de nylon revestida de

prata utilizada para fornecer blindagem para EMI cobrindo um transmissor instalado num ambiente de sinal *wireless* [7].



Figura 33 - Blindagem para EMI cobrindo um transmissor instalado num ambiente de sinal *wireless* (AMS, 2016)

Foi realizado um teste local de Compatibilidade Eletromagnética e Coexistência de forma experimental no Laboratório Nuclear AECL Chalk River, localizado no Canada, concluindo que o ambiente nuclear não apresentou qualquer problema com uma WSN operando na banda ISM e usando a tecnologia ZigBee, não provocando ameaças de EMI ao sistema de instrumentação sensível existente. Os sinais eletromagnéticos não serão afetados pela ionização do ar causada pela radiação gama e a WSN terá uma SNR (Relação Sinal-Ruído) suficiente para se comunicar de maneira confiável. Os nós das WSN poderiam trabalhar em áreas acessíveis em uma NPP por milhares de horas, do ponto de vista da agressividade da radiação gama [24].

2.8 Alimentação Elétrica para os Sensores *Wireless*

Dispositivos de campo sem fio podem ter uma das três opções de energia: bateria, colheita (harvesting) de energia (incluindo solar), ou potência de linha e pode haver várias opções em cada categoria [25].

A confiabilidade de sensores sem fio também recai em sua fonte de energia. Se uma fonte de energia estiver localizada perto do sensor sem fio, as baterias não são essenciais, e a maior disponibilidade de energia suportam taxas de dados mais altas, como os sensores de vibração sem fio exigem. O padrão IEEE 802.11 normalmente será alimentado por linha. Se o acesso a uma fonte de energia for restrito ou caro, a opção de alimentar por bateria é uma opção viável.

Os dispositivos em conformidade com os dispositivos padrão 802.15.4 normalmente serão alimentados por bateria. Neste caso, deve-se determinar a duração da bateria, a frequência de transmissão de dados e a potência de transmissão, que pode resultar em falhas de transmissão [2].

2.8.1 Alimentação Elétrica de linha.

É uma opção onde a energia está disponível ou não é onerosa a sua disponibilização.

2.8.2 Alimentação Elétrica por Bateria

O mais comum será o uso de uma bateria para dispositivos de campo de baixa potência devido à facilidade de implantação.

2.8.3 Alimentação Elétrica por *Power Harvesting* (Energia por “Colheita”) ou Autoalimentada.

Os fornecedores podem fornecer opções de dispositivos autoalimentados ou energia *harvesting* como alternativas às baterias que podem incluir soluções solares, térmicas, de vibração e vento. Técnicas atuais de conversão de energia por térmica e vibração ainda são relativamente ineficientes. Em muitos casos, as soluções de energia *harvesting* também incluem baterias recarregáveis para manter uma fonte de alimentação constante de back-up [25]

2.8.4 Alimentação Elétrica por Transmissão de Energia *Wireless*

Está muito em evidência estudos e testes para transmissão de energia *wireless*, utilizando transmissão de potência por Radiofrequência (RF). Pode ser uma opção viável para um futuro próximo.

3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA TECNOLOGIA WIRELESS

O uso da tecnologia sem fio para monitorar a condição operacional do equipamento fornece uma capacidade de monitoramento contínua ou sob demanda, fornecendo aos usuários dados e, por vezes alarmes, para que possam identificar o início da degradação ou falha do equipamento antecipadamente para que a manutenção possa ser planejada convenientemente com a instalação. Além disso, a tarefa trabalhosa de coleta manual de dados pode ser reduzida, já que o sistema sem fio coleta automaticamente os dados. Equipamentos distantes ou de difícil acesso também podem se beneficiar da adição de sensores sem fio. A fiação adicional não apenas adiciona um custo significativo ao projeto (estimado em até US \$ 2000 por 30 centímetros), mas, em muitos reatores mais antigos, simplesmente não há nenhum eletroduto ou bandeja de cabos existentes disponíveis para instalar um sistema de monitoramento com fio

A instrumentação industrial sem fio é amplamente considerada adequada para monitoramento, controle e alarmes, incluindo alarmes de segurança. Os sistemas podem ser implantados usando uma metodologia ad hoc para começar, mas os usuários são melhor atendidos quando se aproveita a escalabilidade dos sistemas *wireless* usando uma metodologia mais estruturada que impulse a Internet das Coisas. [25] (ISA, 2014)

Em comparação com as soluções cabeadas em aplicações industriais, os sistemas wireless e o WSN (Redes de Sensores Sem Fio) possuem várias vantagens, como a seguir:

- Flexibilidade na instalação / atualização de rede (ISA, 2014). Ou seja, a instalação de rede wireless elimina a necessidade de atravessar cabos através de paredes e andares, além permitir ter redundâncias e não ser intrusivo. As configurações também podem ser alteradas mais facilmente a partir de uma nova demanda.
- Custos de implantação e manutenção reduzidos (ISA, 2014). Ou seja, economia na instalação e de escalabilidade, além de reduzir as manutenções de troca de cabos danificados ou montagem/remontagem de conexões cabeadas para realizar a manutenção de rotina ou corretiva. Facilidade nos diagnósticos e permitir manutenções remotas.
- Descentralização das funções de automação (Aakvaag et al., 2005)
- Melhor atendimento aos impedimentos regulamentares e de segurança na instalação de cabos em áreas de difícil acesso ou perigosas (Shen et al., 2004)
- Aplicável para equipamentos móveis e rotativos (Low et al., 2005)
- Mobilidade para acessar as redes sem fio em tempo real e em qualquer lugar de suas organizações;
- Melhorar a localização e o isolamento das falhas: por exemplo, as tarefas críticas são normalmente asseguradas com fios redundantes, o que pode causar dificuldades para localização e isolamento de falhas (Low et al., 2005).
- Incorporar tecnologias de curto alcance ao sistema de automação (que possui possíveis interfaces com redes de grandes áreas) formando uma rede heterogênea, o que pode melhorar a eficiência do sistema de automação (Low et al., 2005). A Figura 3.1 apresenta um sistema heterogêneo em automação industrial.

- Desenvolvimento de sistemas micro eletromecânicos (MEMS): sensores sem fio integrados com capacidades de comunicação incorporadas oferecem um projeto mais robusto do que conectar fios a dispositivos de pequeno porte. (US Department of Energy, 2002).
- Confiabilidade das redes de campo sem fio que usam redes de malha (*MESH*) são auto organizada, podendo alcançar uma confiabilidade de dados maior que 99% (Emerson, 2017). Os dispositivos servem como conectores de rede enquanto o *gateway* encontra automaticamente os melhores caminhos de comunicação. Quando obstruído, o “gateway” reencaminha o sinal.
- Aumenta a segurança de pessoas ao eliminar a ida ao campo para realização de inspeções em ambientes perigosos e monitorar áreas anteriormente inacessíveis, além de fornecer informações sobre alertas ambientais, que ajudam a mitigar os riscos ocupacionais e ambientais
- Permite tomada de decisões proativas para detectar problemas antes de ocorrerem, reduzindo os riscos de segurança e oferecendo informações sobre condições irregulares e mudanças nas variáveis do processo.

A Figura 34 mostra uma comparação da instalação com fio versus sem fio de um canal de voz sobre protocolo de internet (VoIP) utilizando uma rede WLAN, além de sensores de medição de nível de tanque sem fio na usina de geração de energia Thomas C. Ferguson Power Plant (LCRA) no Texas. [26].

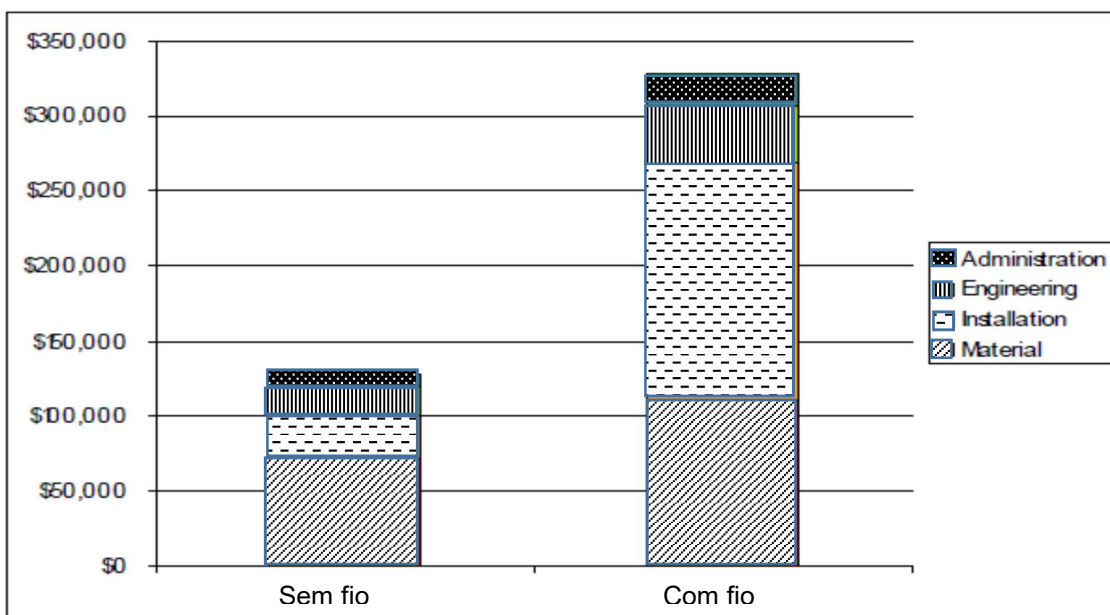


Figura 34 - Comparação entre custos de sistema com fio e sem fio (EPRI, 2008)

A figura 35 apresenta o levantamento de diversas aplicações que estão sendo realizadas com a utilização da tecnologia wireless na indústria nuclear [14].

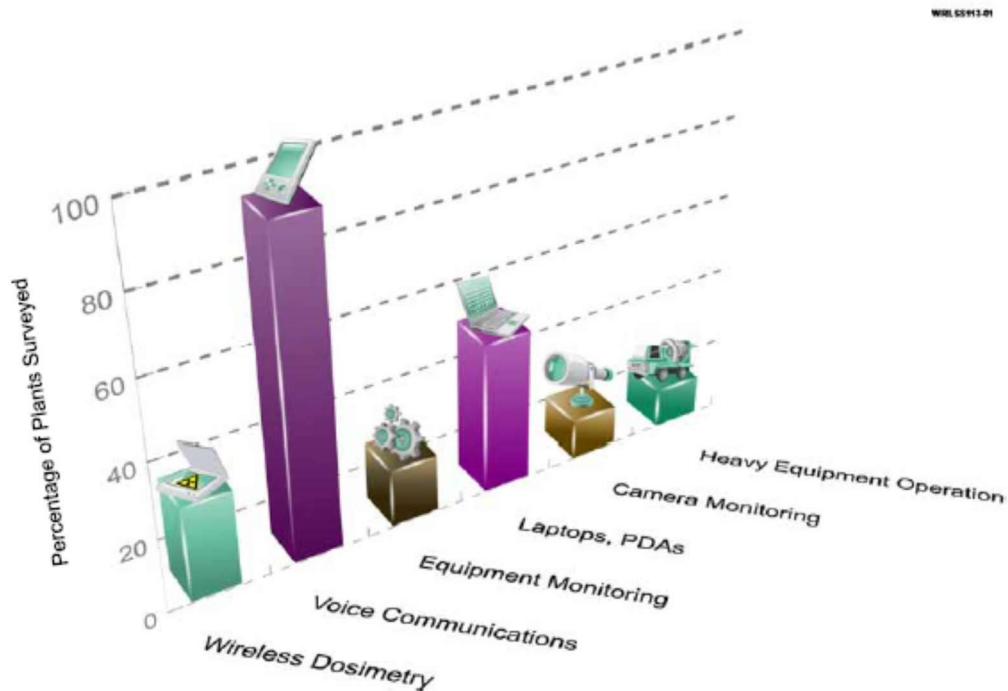


Figura 35 - Aplicações com a utilização da tecnologia wireless na indústria nuclear (AMS, 2011)

Como desvantagens para o emprego da tecnologia de redes sensores wireless existem ainda alguns obstáculos a serem ultrapassados ou desmitificados na indústria, principalmente na área nuclear, tais como:

- Segurança em geral, principalmente a Cibernética, por Vírus e por Software
- Interferências por EMI/RFI
- Latência
- Confiabilidade
- Alimentação Elétrica

A figura 36 apresenta um levantamento realizado na indústria nuclear com a percepção dos usuários em relação aos obstáculos atualmente presentes para aumentar a implantação da tecnologia nuclear [14].

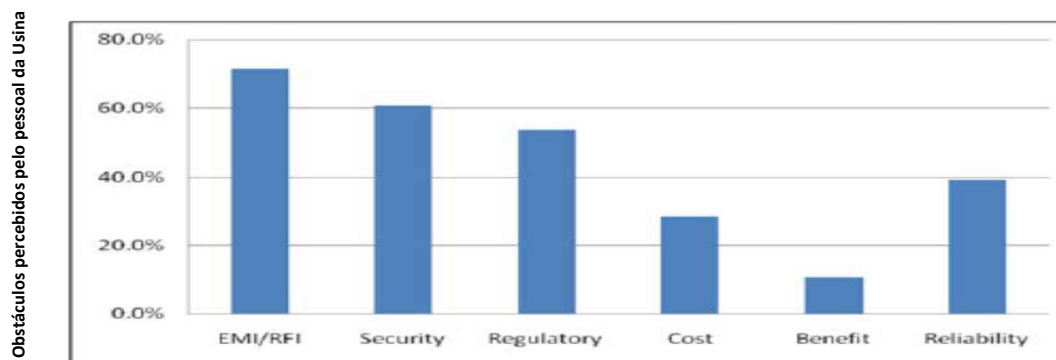


Figura 36 - Percepção de obstáculos para aumentar a implantação da tecnologia wireless na área nuclear (AMS, 2011)

A empresa Emerson justifica a expansão de redes de sensoriamento sem fio para reduzir os custos operacionais de uma planta de processo que já tenha alguns sensores sem fio, como também para aquelas que querem adicionar rapidamente a tecnologia wireless para melhorar as operações, cortar o uso de energia e aumentar a segurança. Os sensores e as redes sem fio podem ser usados em uma grande faixa de medidas do processo, geralmente reduzindo os custos drasticamente se comparados às alternativas cabeadas, com menor tempo de instalação e mínima interrupção [27].

A Emerson também declara que a Tecnologia Wireless oferece uma maneira fácil, rápida e de custo efetivo para aumentar o seu alcance e obter dados inteligentes e em tempo real. Essas redes não intrusivas, auto organizadas e autoalimentadas podem ser implantadas em minutos e facilmente integradas em sistemas existentes.

As soluções sem fio apresentam menos cabeamento, comissionamento mais rápido e dispositivos sem calibração, reduzindo o tempo de instalação e os custos em mais de 50% e minimizando a necessidade de inspeções de campo, equipamentos, engenharia e treinamento, como mostrado na figura 37 [27].

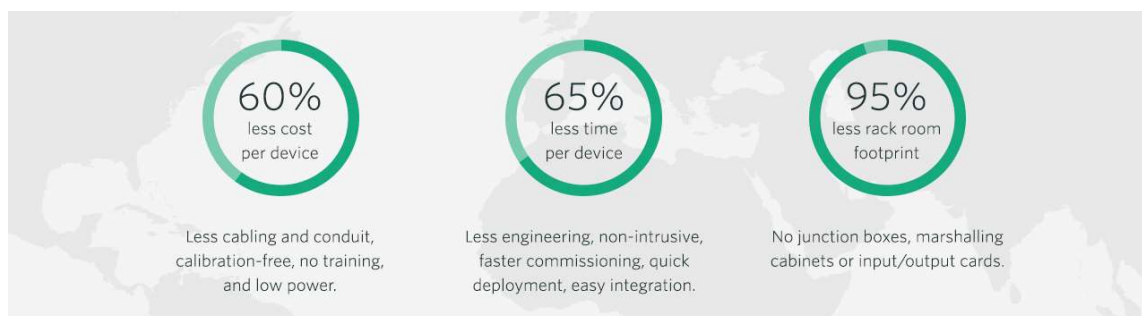


Figura 37 - Estatística empresa Emerson sobre vantagens do uso da tecnologia wireless (Emerson, 2017)

A instrumentação industrial sem fio está se tornando rapidamente a tecnologia de escolha para uma crescente classe de aplicações. Uma implantação sem fio economiza custos significativos em comparação com uma instalação equivalente com fio, resultando em economia de 20 a 30 por cento em configurações simples. As reduções de custos podem ser ainda mais atraentes em instalações em escalas ou em locais remotos. Onde a fiação tem custo proibitivo ou inviável, a tecnologia wireless permite uma melhor prática de instrumentação sempre que for necessário para uma operação industrial eficiente e segura [11].

As vantagens de custo da instrumentação sem fio melhoram com a escala. Em um sistema com fio, o custo de cada instrumento adicional requer fiação extra e mão-de-obra, equipamentos e manutenção associados. Um sistema sem fio, se projetado para escalabilidade, pode acomodar dispositivos adicionais com a mesma infraestrutura e sem fiação adicional. Pela primeira vez, as aplicações com centenas ou milhares de pontos de medição podem ser razoavelmente contempladas [11]

Até recentemente, a maioria dos usuários e especialistas consideravam os instrumentos sem fio como intrinsecamente inferiores aos seus equivalentes com fio, com instrumentação com fio sempre sendo preferida quando viável. À medida que a experiência com a tecnologia sem fio cresce, essa atitude está mudando, com a wireless tornando-se a seleção de usuários padrão para aplicações bem comprovadas. Hoje, a maioria dos usuários exigem justificção de custos para instrumentação com fio em aplicativos onde a tecnologia sem fio tenha demonstrado que excede os requisitos do usuário [11].

A Tabela 8 resume as principais diferenças entre a instrumentação com fio e sem fio. Algumas das características listadas, como desvanecimento e interferência, relacionam-se com considerações de rádio. Outras características, como a substituição da bateria, relacionam-se a restrições de energia quando a instrumentação sem fio opera em locais sem energia. A Tabela 9 também sugere um conjunto de desvantagens geralmente acordadas da instrumentação sem fio neste momento. Essas considerações podem ser geralmente agrupadas como operações relacionadas à bateria e relacionadas à rádio interferência [11].

Tabela 8 - Instrumentação com fio versus sem fio (ISA, 2014)

	Instrumentação com fio	Instrumentação sem fio (Wireless)
Instalação	Viabilidade e custo da fiação	Arquitetura e posicionamento do ponto de acesso
	Dados e alimentação	
	Comprimento do cabo, regras de configuração	Alcance para acessar pontos de acesso e vizinhos
	Equipamentos de infraestrutura	Projeto de rede de malha - Mesh
Instrumentação	Completa Gama de instrumentos disponíveis	Faixa parcial de instrumentos disponíveis
	Sem restrições de bateria	Adaptadores sem fio, se energia disponível
	Comprovado em uso por décadas	Comprovado em uso há anos
	Geralmente, nível de integridade de segurança (SIL) classificado	Às vezes SIL classificado
	Relatórios contínuos	Relatórios Periódicos
Desempenho	Capacidade do barramento, ex. 4 a 20 mA	Atualização e disponibilidade de dados, ex. 30 segundos a 99,99%
		Capacidade de canal compartilhado, ex. 90.000 espaços de tempo/min
	Confiável até que a fiação falhe	Transientes do canal
	Corrosão, vibração, etc.	Enfraquecimento, interferência, bloqueio, etc.
Gerenciamento	Adiciona fiação e equipamentos conforme necessário	Gestão de curto prazo
	Corrigi a fiação após falhar	Redundância para auto-cura automática
		Gestão a longo prazo
	Monitora Relatórios de Instrumentos	Monitorar diagnósticos de rede
		Antecipar problemas sistemáticos
		Reconfigura a infraestrutura sem fio
		Gerenciamento de bateria
		Gestão do espectro dos rádios
Segurança	Segurança física do dispositivo e fiação	Segurança física do dispositivo
		Gerenciamento de credenciais e chaves
		Diagnóstico de rede
Redundância	Fios extras para redundância	Malha de rádios
		Rádio como complemento a interligação com fio

4. TECNOLOGIA *WIRELESS* NO MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE MOTORES EM USINAS NUCLEARES

A tecnologia sem fio revoluciona o monitoramento de condições que tem sido usada pela indústria há muitos anos para otimizar a manutenção e a produção, evitando o tempo de inatividade não planejado para aumentar a produtividade geral. O principal parâmetro utilizado é a vibração, em virtude de sua relevância direta para a condição de máquinas rotativas e seu valor diagnóstico [28].

Os instrumentos usados para coleta de dados geralmente são coletores de dados portáteis para programas manuais / locais ou sistemas on-line permanentemente instalados que coletam e armazenam dados automaticamente. O uso deste último está bem estabelecido, especialmente em máquinas críticas para a produção. No entanto, ainda existem várias barreiras para uma adoção mais ampla, incluindo:

- Alto custo de instalação, especialmente em áreas perigosas;
- Justificativa insuficiente para um sistema permanente em certas máquinas de balanço de energia da planta; e,
- Máquinas de deslocamento / movimento em que o cabeamento fixo não é possível [28].

Sensores de vibração com transmissão de sinal sem fio estão sendo desenvolvidos e implementados para monitorar máquinas rotativas em usinas nucleares e reatores. Algumas aplicações para monitoração de vibração também utilizam sensores com poucos metros de fio que são instalados em condicionadores de sinal *wireless* (gateway, pontos de acesso, sink, hub etc.) próximos ao equipamento e daí transmitidos numa conexão sem fio a um módulo auxiliar ou diretamente a área de coleta ou de análise dos dados. Antes da sua instalação, deve-se cuidar para se estabelecer uma compatibilidade eletromagnética dos sinais transmitidos e de coexistência no ambiente da planta.

Como vantagens para a monitoração da vibração usando a tecnologia sem fio, podemos citar as instalações temporárias para solução de problemas e monitoramento remoto. A tecnologia sem fio elimina a necessidade de passagem de cabos para comunicações e também reduz drasticamente os comprimentos do cabo do sensor. Os benefícios incluem redução do custo de instalação, mobilidade / portabilidade, operação sem restrições, conveniência e confiabilidade.

Como desafios para o monitoramento de vibração sem fio, existe a necessidade de alta largura de banda de frequência, devido às quantidades relativamente grandes de dados que precisam ser enviados pelo link sem fio. Além disso, boa faixa dinâmica, baixos níveis de ruído e recursos de processamento de alto nível, além da capacidade de capturar dados no momento certo, também são requisitos fundamentais. Dispositivos alimentados por bateria que são necessários para fornecer energia incorporada devem satisfazer as demandas do cliente por uma longa vida útil. Os dispositivos e sensores, assim como os componentes da rede sem fio, também devem lidar com as condições comumente encontradas no ambiente industrial, como exposição à água, temperaturas elevadas, interferências eletromagnéticas e por radiofrequência, classificações de áreas perigosas, obstruções, localização física e distância. Segurança sem fio é uma prioridade [28].

4.1. Monitorização da Vibração de Máquinas Rotativas

Há uma série de máquinas rotativas em uma usina de energia, que pode exigir o monitoramento contínuo de vibrações. Exemplos de tais máquinas incluem bombas de refrigeração do reator, bombas de água de alimentação, turbinas, motores, geradores, compressores, ventiladores, geradores diesel de emergência e outros dispositivos. Esses equipamentos são os componentes ativos da planta. A vibração destes equipamentos é causada por muitas fontes, incluindo desbalanço do eixo (distribuição de massa inadequada), desalinhamento (paralelo e desvio), folga, acionamento de engrenagem, anomalias, defeitos nos rolamentos, defeitos nos acionadores das correias e correntes, entre outros. Muitas vezes, esses defeitos podem ser detectados e quantificados, transformando as medições para o domínio da frequência e calculando variações de frequência e variações de energia em diferentes bandas de frequência dos espectros de sinal [29].

O monitoramento de condições de equipamentos rotativos é o processo de monitorar várias características operacionais de uma máquina ou conjunto de máquinas para identificar alterações que podem ser indicativas de uma falha em desenvolvimento, permitindo que a manutenção seja programada antes da falha do equipamento. Um benefício adicional do monitoramento de condições é a capacidade de entender melhor como o conjunto de máquinas reage às condições normais e anormais de operação da planta e como essas condições afetam a operação de longo prazo do equipamento.

A Figura 38 apresenta um sistema com tecnologia *wireless* de monitoramento de condições operacionais para motores de ventiladores em uma torre de resfriamento de usina. A rede *Ethernet* sem fio custou significativamente menos e a instalação foi

considerada fácil e pode ser instalada em três semanas, em vez de seis meses, quando comparado com o cabo de fibra óptica [30].

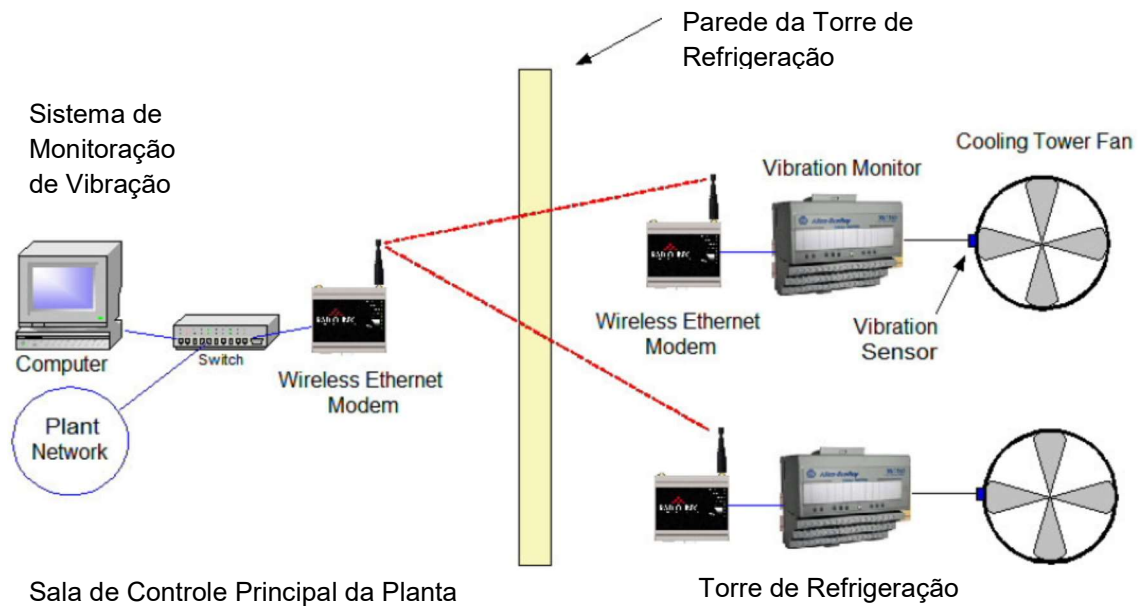


Figura 38 - Um sistema de monitoramento de vibração sem fio para ventiladores em uma torre de resfriamento de usina (ProSoft, 2007)

A empresa Exelon, proprietária de diversas usinas nucleares de potência nos Estados Unidos das Américas, implantou sistemas de monitoração *wireless* de condição operacional para medição online de vibração e temperatura em conjuntos motor-bomba, conforme figura 39 [10].

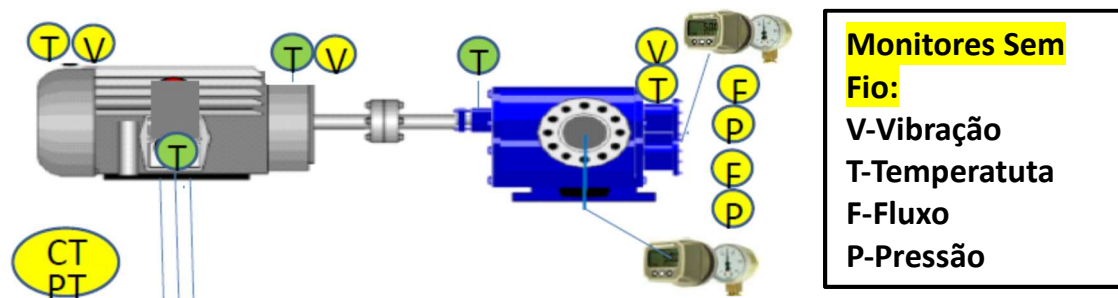


Figura 39 – Monitoração típica wireless de condição de motores na Exelon Generation, 2009.

Exceto em raros casos de uma falha catastrófica de algum componente, os problemas de vibração geralmente não avançam drasticamente em um breve período de tempo. Este fato é geralmente citado para apoiar a ideia de inspeções periódicas. Infelizmente, os problemas de vibração podem aumentar lentamente até atingirem um ponto crítico, e então a subida torna-se muito mais íngreme em direção à falha, o que

pode ocorrer facilmente antes da próxima inspeção manual programada. O monitoramento contínuo pode detectar essas situações quando a curva de vibração começa a subir em direção a um ponto de falha, informando aos técnicos de manutenção enquanto ainda há tempo para responder antes de uma falha e interrupção (Shoku Yamamoto, 2017, da Yokogawa Electric Corp, Tóquio)

As medições de vibração contínuas e online são realizadas usando acelerômetros ou sensores de proximidade. Os acelerômetros são selecionados com base em sua largura de banda de frequência e na necessidade de tamanho apropriado.

Dados dos acelerômetros e dos sensores de proximidade são analisados nos domínios de tempo e da frequência para extração de informações das medições de vibração. As técnicas clássicas do domínio do tempo podem incluir o valor RMS, a análise de forma de onda temporal, os valores de pico no sinal; o fator de crista (relação entre o valor do pico e o valor RMS) etc. A figura 40 apresenta uma curva senoidal típica dos parâmetros de vibração de uma máquina rotativa a serem medidos no domínio do tempo (pico e RMS).

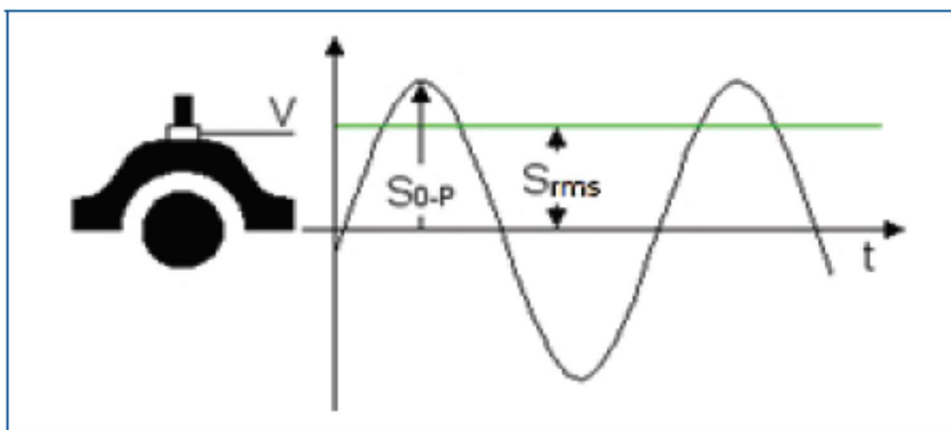


Figura 40 - Vibração de Mancal de um motor (S_{rms} = valor RMS), (S_{0-p} = valor de pico)

As técnicas clássicas não paramétricas de domínio de frequência podem incluir: funções de densidade espectral de potência automática e transversal, funções de coerência, funções de transferência, relações de ângulo de fase etc.

Os dados de condições operacionais dos equipamentos da planta nem sempre são estacionários (alguns em forma de transientes) no sentido estatístico. Estes sinais transitórios e não estacionários incluem partida e desaceleração do conjunto bomba / motor, mudanças repentinas nos níveis de sinais e outras causas. Existem diversas

técnicas computacionais para processar sinais transientes, tais como Transformada de Fourier de Curto Prazo, Transformada *Wavelet*, Transformada de Hilbert-Huang (HHT) e Modelos de Tempo Discreto Dependentes do Tempo.

A escolha da monitoração vibração para iniciar o projeto de viabilidade do uso de tecnologia *wireless* em usinas nucleares, se deve ao fato que a maioria dos problemas com equipamentos rotativos está relacionado a problemas de rolamentos / mancais e motores [31]. Máquinas rotativas podem ser encontradas não apenas em instalações nucleares, mas também em instalações não nucleares, como fábricas de produtos químicos, petróleo, geração elétrica de forma geral (principalmente nas eólicas). O equipamento rotativo é frequentemente crítico para o funcionamento da usina.

Por esses dois motivos, o equipamento rotativo apresenta uma oportunidade ideal para testar os benefícios dos programas integrados de manutenção preditiva on-line, especialmente aqueles baseados em tecnologias de coleta de dados sem fio.

De todas as técnicas empregadas para manutenção preditiva (PdM), a análise de vibração é a mais empregada na indústria atualmente, quer seja por fio, manual ou *wireless*. Com o emprego da monitoração de temperatura juntamente com a vibração, pode-se ter um bom diagnóstico das condições operacionais de um motor.

Muitos estudos mostraram a utilidade da análise de vibração para avaliar a condição do equipamento rotativo. O método de análise de vibração avalia o movimento dinâmico de um sistema mecânico de múltiplos elementos. A vibração mecânica pode ser classificada como movimento translacional (deslocamento de um objeto ao longo de um caminho linear) ou movimento rotacional (deslocamento angular [torção] em torno de um eixo fixo). A vibração, tanto de translação como de torção, é causada por forças externas (como o impacto de um dente de engrenagem danificado em outro dente de engrenagem) ou pela frequência natural de oscilação, também conhecida como ressonância, característica da estrutura mecânica. A condição de um sistema mecânico sob várias condições de operação pode ser avaliada pela compreensão das causas da vibração mecânica. Uma mudança na amplitude das vibrações existentes em frequências específicas pode indicar uma mudança na condição do sistema ou de um componente dentro do sistema.

Sensores de proximidade sem contato são usados para medir deslocamentos de baixa frequência e baixa amplitude em relação ao local de montagem do sensor. Alternativamente, sensores piezoelétricos, cuja saída pode ser integrada da aceleração

à velocidade e integrada novamente ao deslocamento, podem ser usados. Sensores de velocidade são normalmente usados para medir o movimento de vibração em baixas a médias frequências. Os acelerômetros piezoelétricos são o tipo de sensor predominante e mais popular para monitoramento de vibração, pois podem medir a aceleração de frequências baixas a muito altas.

Para monitorar máquinas rotativas, os dados de vibração são coletados e tipicamente analisados usando um algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT), que produz o espectro de dados de vibração. Esses dados são então analisados ou comparados com uma linha de base ou assinatura para identificar o início da degradação ou falha do equipamento. Isso geralmente é feito com registradores portáteis de dados de vibração que são transportados pelas instalações e conectados ao equipamento.

Como exemplo nacional, observe o gráfico da figura 41 que apresenta a monitoração de vibração da Bomba de Remoção de Calor Residual e do Sistema de Refrigeração do Circuito Fechado de Segurança da Usina Nuclear Angra 2, realizada com coleta de dados manual, mensalmente no campo.

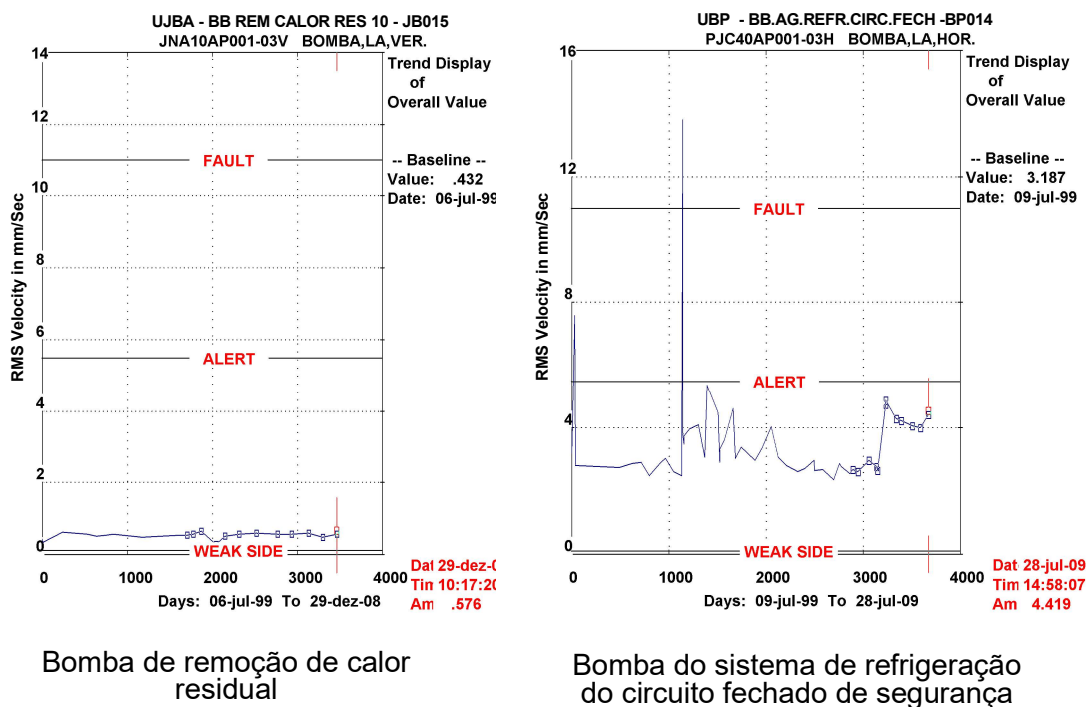


Figura 41 - Monitoração de vibração de bombas da Usina Nuclear Angra 2, com coleta manual de dados a cada mês (Eletronuclear, 2012)

Igualmente a figura 42 apresenta o espectro de Vibração da Bomba Principal de Refrigeração (MCP) de um Reator WWER-1000 em condição original normal (a) e com degradação do mancal (b) [34].

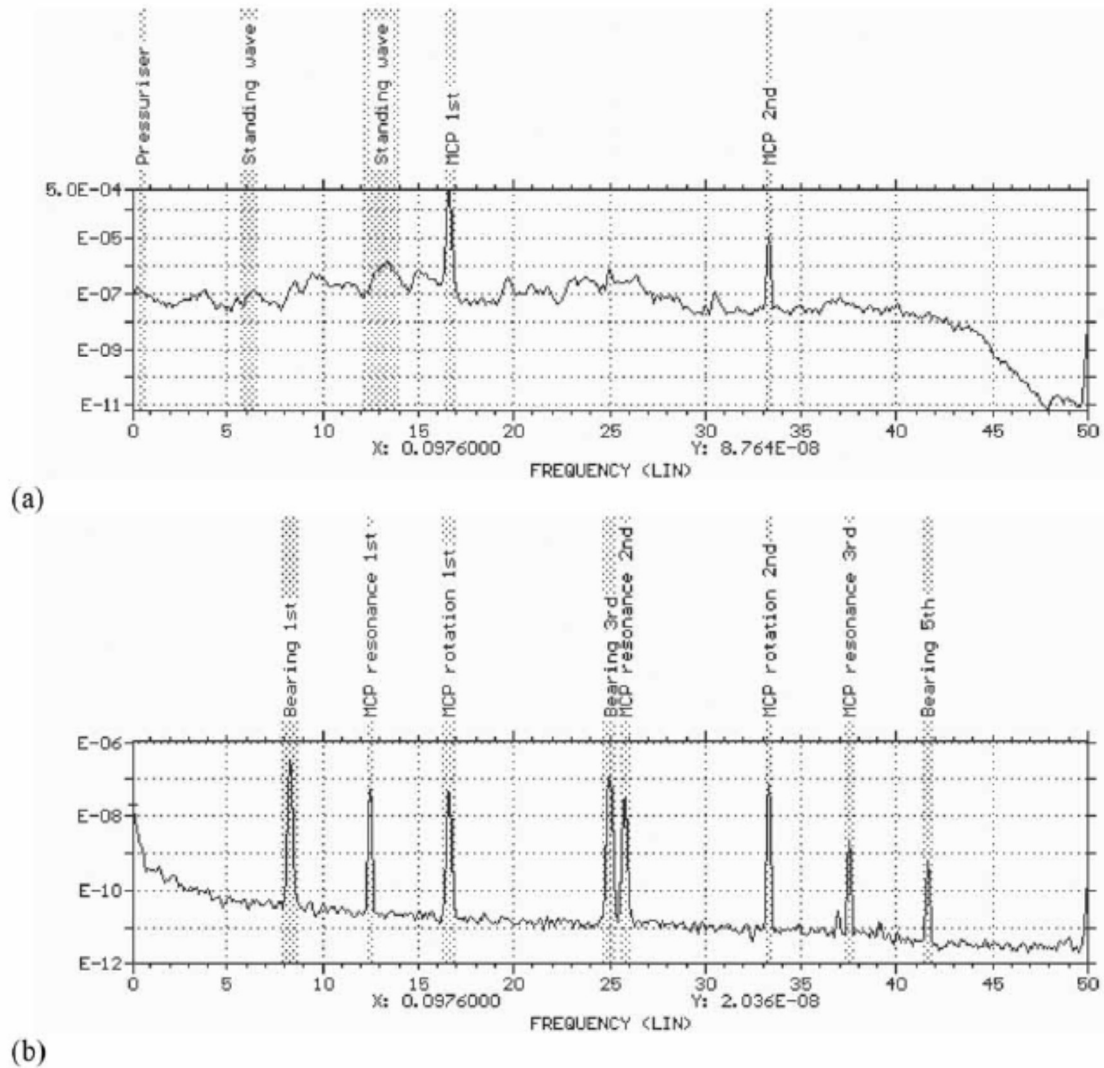


Figura 42 - Espectro de Vibração da Bomba Principal de Refrigeração (MCP) de um Reator WWER-1000 em condição original normal (a) e com degradação do mancal (b) (IAEA, 2008)

O monitoramento de vibrações contínuo e on-line é realizado com a aquisição de dados de acelerômetros montados em todas caixas de mancais de interesse para o equipamento sob inspeção. Os dados adquiridos podem ser armazenados em dispositivos nas máquinas ou transmitidos para um computador central via cabeamento ou transmissão de dados sem fio. Em algumas aplicações, os dados são transferidos via redes para um centro de serviços para análise e diagnóstico. A informação processada pode ser usada para enviar alarmes para o pessoal apropriado ou, se normal, pode ser arquivado para uso futuro. Sistemas especialistas são frequentemente

usados para analisar as assinaturas do sinal (dados de base de referência) e fornecer informações para tomada de decisão do operador [29].

Sensores *wireless* também podem ser utilizados como redundantes numa instalação cabeada, no caso da ocorrência de falha do sensor cabeado, sem que a segurança seja comprometida com a instalação do sensor *wireless*. A figura 43 apresenta dois tipos de instalações de monitoração de vibração *wireless*.



Figura 43 - Dois tipos de Sensores de Vibração Sem Fios (EPRI, 2009)

A pirâmide de ativos da figura 44 mostra a distribuição de criticidade típica dos ativos rotativos em qualquer planta. Normalmente, apenas os ativos críticos importantes, essenciais e mais caros são considerados para monitoramento on-line [31].



Figura 44 - Pirâmide de ativos rotativos por criticidade (Hashemian, 2011)

Os turbo-geradores e as bombas de refrigeração do reator são as máquinas rotativas mais importantes e críticas em plantas nucleares. Monitoramento de vibrações, diagnósticos, proteção e manipulação de dados são partes essenciais de seus procedimentos integrados de supervisão. De acordo com experiências operacionais, valores de vibrações acima de determinados valores nesses equipamentos requerem ação imediata para planejar uma manutenção de urgência ou desligamento em emergência, a fim de evitar a quebra catastrófica dos mesmos e provocar uma perda financeira de grande monta.

À medida que as plantas envelhecem, elas exigem maior manutenção de máquinas rotativas para identificar anomalias à medida que ocorrem e evitar falhas antecipadamente. Com o advento dos sensores sem fio, vários sensores sem fio podem ser implantados em uma instalação a um baixo custo. Além da vibração, os sensores podem medir temperatura, umidade e outras variáveis. Eles podem apresentar uma imagem holística da saúde do equipamento e revelar outros problemas, como superaquecimento e vazamentos. Esses dispositivos de medição sem fio estão sendo disponibilizados por diversos fabricantes e podem ser conectados a equipamentos rotativos para monitoramento de condições [32]. A tabela 9 apresenta alguns fornecedores do mercado americano de medidores de vibração *wireless*.

Tabela 9 - Exemplos de opções de sensores de vibração no mercado americano (EPRI, 2018) [6]

Manufacturer	Model	Device Packaging	Protocol	Topology	Frequency	Advertised Wireless range (meters)	Advertised Max Battery Life (years)	Cost
PCB	Echo Vibration Sensor	All-In-One	Proprietary	Star	900 MHz	100	5	\$ 1,000.00
Petasense	Vibration Mote Model 1	All-In-One	Bluetooth	Star	2.4 GHz	100	2	\$ 400.00
Petasense	Vibration Mote Model 2	All-In-One	Bluetooth	Star	2.4 GHz	100	2	\$ 600.00
Petasense	Vibration Mote Model 1	All-In-One	Wifi	Star	2.4 GHz	90	2	\$ 400.00
Petasense	Vibration Mote Model 2	All-In-One	Wifi	Star	2.4 GHz	90	2	\$ 600.00
Proaxion	Tactix	All-In-One	Proprietary	Star		33	5	\$ 580.00
Scanimetrics	WITAP	Adapter	Proprietary	Mesh	900 MHz	10	2	Not Listed
Sensor Works	BluVib	All-In-One	Bluetooth	Star	2.4 GHz	100	0.1	\$ 2,000.00
SKF	CMWA 8800	All-In-One	WirelessHART	Mesh	2.4 GHz	50	5	Not Listed
Uptime Solutions	Storm-X	All-In-One	Proprietary	Star	900 MHz	Not Listed	Not Listed	Not Listed
Yokogawa	Field Wireless Adapter	Adapter	ISA100	Mesh	2.4 GHz	220	10	Not Listed

Tecnologias Inovadoras estão sendo desenvolvidas para monitoração de vibração com utilização de câmeras de vídeo *wireless* (IRIS M) para aplicações onde o contato com o equipamento não é possível. O deslocamento e o movimento de cada pixel na imagem são captados e medidos pela câmera. Um software de processamento

de imagem personalizado gerará as formas de onda das vibrações captadas. O software mede o movimento sutil e amplifica para ser visível a olho nu [10].

4.2. Estudos de caso para monitoração de vibração com uso de tecnologia

Wireless:

- **Evitando falha catastrófica de rolamento pela empresa SKF**

O sistema sem fio da SKF usado foi usado por um cliente de fábrica de papel para evitar com sucesso uma falha catastrófica nos rolamentos. A partir desta experiência, o custo de falhas semelhantes foi estimado em várias centenas de milhares de dólares. Durante as verificações de rotina usando analisadores manuais, o cliente encontrou danos na pista do anel interno-interno de um rolamento de anel triplo na seção de prensa da máquina de papel. Uma parada planejada deveria ocorrer em algumas semanas, mas não se sabia se o rolamento poderia durar até então. Um sistema de monitoramento sem fio foi instalado (Figura 43) para fornecer monitoramento 24 horas e exibir os dados para os operadores da máquina. As principais vantagens do sistema sem fio foram a facilidade e a velocidade de instalação e a coleta e exibição automatizadas de dados [28].



Figura 45 – Instalação Temporária de um sistema *wireless* de monitoração de mancais críticos (SKF, 2018)

A exibição de dados permitiu que os operadores monitorassem a deterioração do rolamento a cada hora. Os dados resultantes (Figura 46) mostraram que a condição do rolamento era severa, levando a decisão de não esperar pela parada programada, mas substituí-la o mais rápido possível.

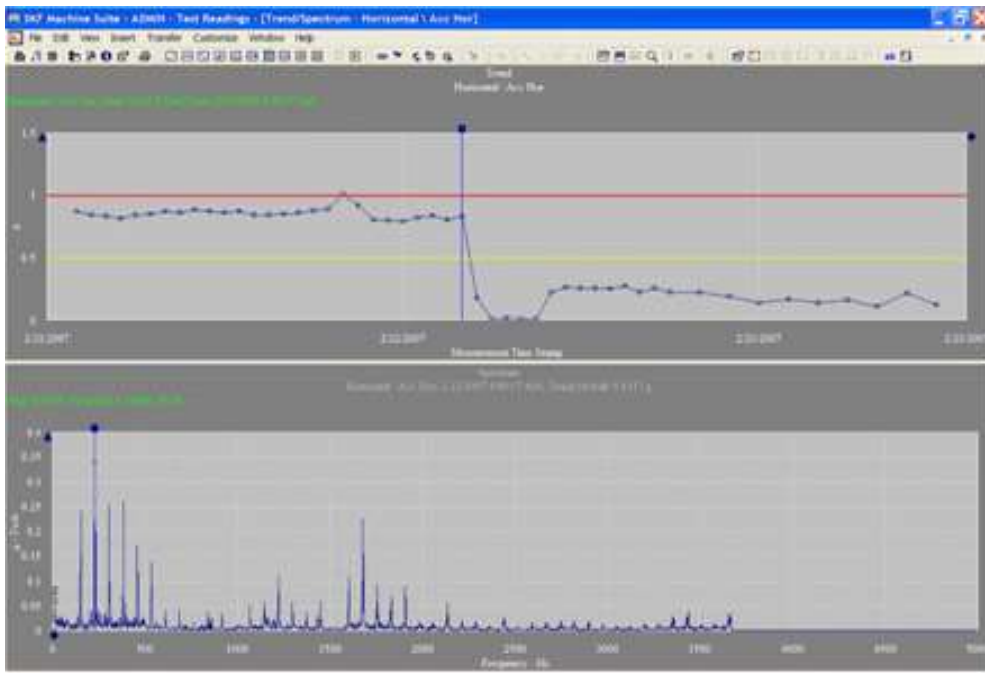


Figura 46 - Resultados da Monitoração da Condição do Equipamento (SKF, 2018)

Um exame subsequente confirmou que o rolamento estava tão danificado que não teria durado até a parada programada (Figura 47). Assim, além de evitar tempo de inatividade prolongado, também foram evitados danos severos a carcaça do enrolamento e ao feixe hidráulico [28].



Figura 47 - Mancal danificado (SKF, 2018)

- **Monitoração de Vibração Torsional do Eixo de Turbo Geradores pelo EPRI**

Exemplo de desenvolvimento de monitoração de condição operacional de máquinas rotativas, é um caso publicado na revista Power Magazine em 2016, onde o EPRI desenvolveu uma técnica para uma monitoração de vibração torsional do eixo de Turbo Geradores, utilizando tecnologia sem fio [33].

As sondas de proximidade atualmente disponíveis usadas como sensores de vibração do eixo nos mancais não podem medir o torque. O novo sensor ajudará os operadores da planta pela monitoração dos pulsos de torque causadas pelas interações da rede elétrica para garantir que não produzem vibração e fadiga do componente do eixo. Se não for detectado, a vibração torsional resultante pode levar a danos devido ao acúmulo de alto ciclo de fadiga nos elementos do rotor altamente tensionados, tais como pás de turbinas, acoplamentos, eixos de excitação e anéis de retenção etc.

O método usado para identificar as frequências naturais de torção foi um sistema de telemetria sem fio para medir e analisar o esforço dinâmico e a aceleração no eixo. Como resultado, a indústria de geração de energia precisa de uma tecnologia econômica e confiável para medir as frequências naturais do eixo nas unidades operacionais. A tecnologia ideal deve ser instalada e usada com impacto mínimo nas operações da planta e ser suficientemente robusta para sobreviver a tarefa de monitoramento a longo prazo. Veja as figuras 48 a) e b), que mostram o sistema de telemetria e a montagem física dos sensores de vibração *wireless* [33].

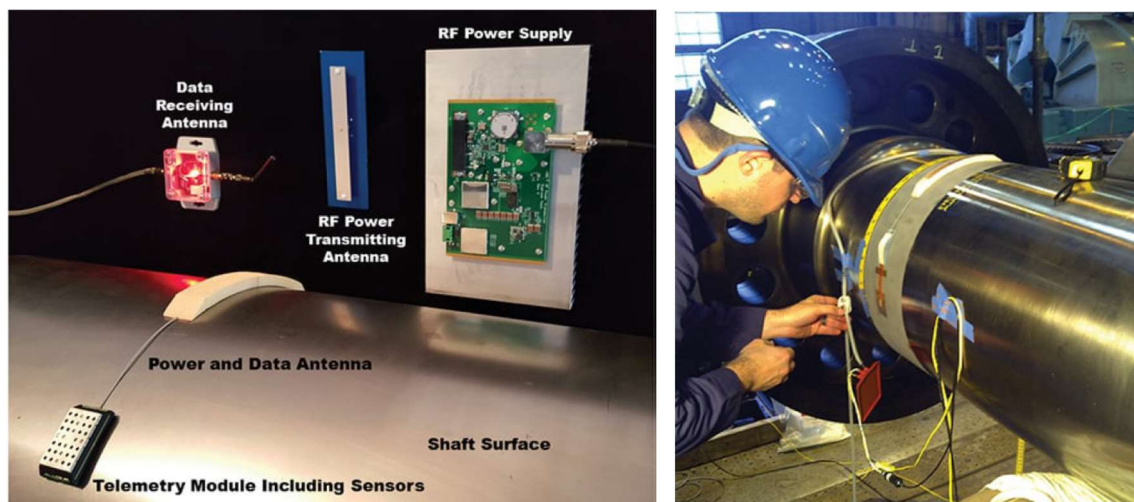


Figura 48 – a) Componentes do Sistema de Telemetria Torsional do Eixo. b) Protótipo de montagem dos sensores de vibração *wireless* no eixo do turbo gerador (EPRI, 2016)

Até o momento, os sensores de torção do protótipo do EPRI foram instalados em três locais de eixo em duas unidades geradoras separadas. O tempo de operação acumulado representa um total de 11 meses de operação sem falha dos sensores do eixo, das placas de circuito ou dos conjuntos de antenas estacionárias [33].

5. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA TECNOLOGIA *WIRELESS*

Diversas aplicações da tecnologia wireless estão sendo utilizadas, seja ela em redes de comunicações simplesmente para transmissões de voz e mídia assim como para as redes de sensores sem fios (WSN). Essas implantações já existem para equipamentos portáteis, instalados definitivos e temporários, principalmente em usinas de produção de energia a carvão, gás e óleo de forma mais abrangente.

Richard Rusaw, gerente sênior de projetos do EPRI, disse que as estimativas para instalar o cabeamento em uma usina de energia nuclear podem chegar a US\$2.000/pé, de modo que a tecnologia sem fio também pode fornecer economias de custos significativas (EPRI, 2009).

O uso da tecnologia sem fio fornece uma solução robusta e elegante, expandindo a obtenção de dados, melhorando as comunicações, reduzindo os custos de manutenção da planta e facilitando o monitoramento on-line de equipamentos críticos dentro da contenção. Monitoramento de equipamentos de processos na contenção com sensores sem fio poderiam ajudar a evitar paradas forçadas, proporcionando uma economia de R\$3.000.000,00 por dia ou mais.

Na indústria nuclear já existem aplicações para monitoramento de equipamentos, monitoração de doses de radiação, monitoração ambiental, suporte de infraestrutura de paradas para troca de combustível etc. Estudos estão em andamento para diminuir as zonas de exclusão e ultrapassar os obstáculos devido a confiabilidade e interferências eletromagnéticas por rádio transmissão da tecnologia wireless. Ainda não há uma autorização clara do órgão regulador para permitir o uso da tecnologia wireless em ações de controle e segurança das usinas nucleares. Algumas entidades, fabricantes e organizações estão unidas para este sucesso, tais como EPRI, ISA, WirelessHart, Yokogawa, Emerson, Honeywell, Westinghouse, Framatome etc.

A Figura 49 mostra um subconjunto das aplicações potenciais para tecnologias sem fio em usinas nucleares, enquanto que a figura 50 apresenta a porcentagem de uso da tecnologia wireless em usinas nucleares.



Figura 49 - Aplicações sem fio em usinas nucleares (IEEE 2011, AMS 2012)

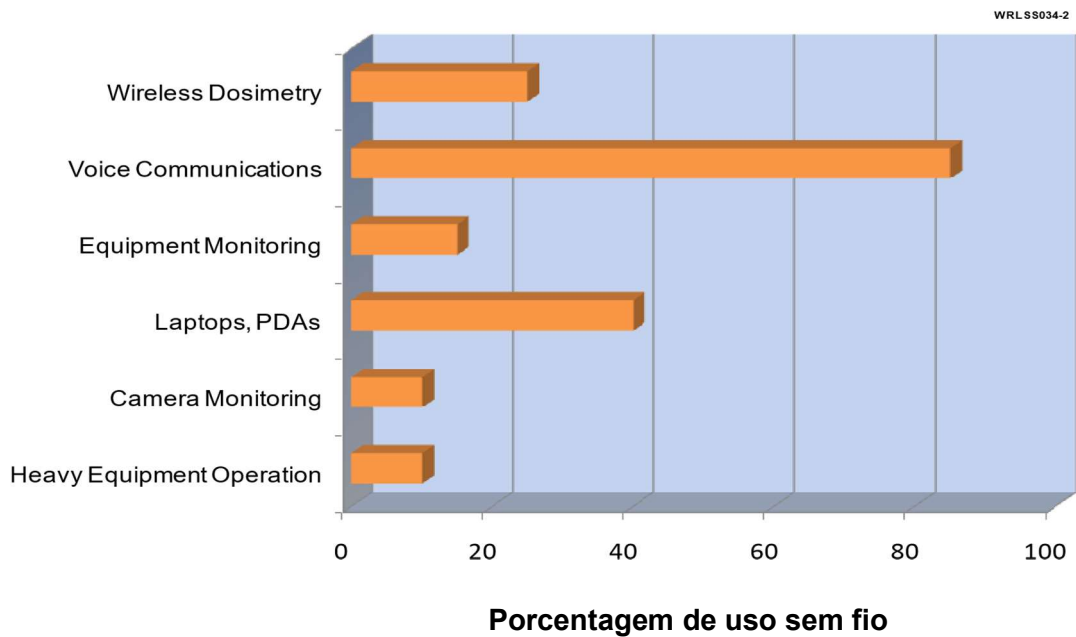


Figura 50 - Resultados do levantamento do uso de tecnologia sem fio em usinas nucleares (IEEE, 2011)

Na figura 51 são apresentados sensores utilizados na tecnologia sem fio, como o transmissor de pressão e monitor de posição de válvulas. Em algumas instalações essa monitoração remota de válvulas e parâmetros de processo não existem para melhor decisão de ações da equipe de operação, requerendo rondas locais,

promovendo atrasos e perda de produção ou mesmo riscos operacionais, como inundações, liberações indevidas etc.



Figura 51 - Sensor Wireless e Monitor de Posição de Válvulas (Emerson, 2015)

A tabela 10 mostra uma lista de alguns fabricantes de sensores wireless com suas especificações gerais. Para obter maiores detalhes, deve-se ir à página dos catálogos dos fabricantes.

Tabela 10 - Exemplos de fabricantes de sensores wireless com especificações (EPRI, 2009)

	Fabricante	Frequência de Operação	Ótima Vida da Bateria	Faixa	Topologia da Rede	Segurança
1	Accutech	900 MHz	20 anos	3000 ft (914 m) LOS* 1000 ft (305 m) NLOS	Estrela	Proprietário
2	Azima DLI	2.4 GHz	2 anos	N/A	N/A	WEP
3	Honeywell	2.4 GHz	10 anos	1000 ft (305 m) LOS	Malha	WPA2, AES FIPS 140-2
4	Oceana	2.4 GHz	ac	300 ft (91 m) LOS	Piconet	Bluetooth 1.1
5	Impact-RLW	2.4 GHz	ac	300 ft (91 m)	Estrela	WEP
6	Emerson	900 MHz or 2.4 GHz	10 anos	650 ft (198 m)	Malha	AES FIPS 197
7	Techkor	900 MHz	1 ano	250 ft (76 m) LOS	Estrela com Repetidor	Encriptado
8	National Instruments	2.4GHz	ac	300 ft (91 m) LOS	Estrela	WEP, WPA, WPA2
9	Microstrain	2.4 GHz	30 dias	230 ft (70 m) LOS	Estrela	AES 128

10	Crossbow	868/915 MHz or 2.4 GHz	1 ano	500 ft (152 m)	Malha	AES 128 bit
11	Newport	2.4 GHz	2 anos	3200 ft (975 m) LOS	Estrela	N/A
12	Electrochem	2.4 GHz	1 ano	300 ft (91 m) LOS 90 ft (27 m) NLOS	Malha	AES 128 bit
13	ProSmart	2.4 GHz	ac	1.5 mi (2.4 km) LOS 650 ft (198 m) NLOS	Ponto a ponto	SSL 128 bit
14	Timken	2.4 GHz	4.5 anos	1.2 mi (1.9 km) LOS 1900 ft (579 m) NLOS	Ponto a ponto	SSL 128 bit
15	GE Energy	2.4 GHz	3 anos	300 ft (91 m) LOS	Malha	AES 128 bit (FIPS 297)

*LOS: Clear Line of Sight path between transmitter and receiver.

5.1. Testes do Uso da Tecnologia *Wireless* no Reator de Pesquisa Argonauta – Instituto de Energia Nuclear (IEN)

- **Na Sala de Controle do Reator de Pesquisa Argonauta** do Instituto de Energia Nuclear (IEN), localizado na Ilha do Fundão – Rio de Janeiro, o autor realizou um teste básico de Interferência Eletromagnética ou por radiofrequência durante a atividade de ativação de fontes. A equipe de Instrumentação e Controle da planta está testando monitores de radiação de área, tipo Geiger Mueller, com comunicação sem fio (*wireless*) para computadores e aparelhos celulares habilitados pela entidade, como mostrado na figura 52.

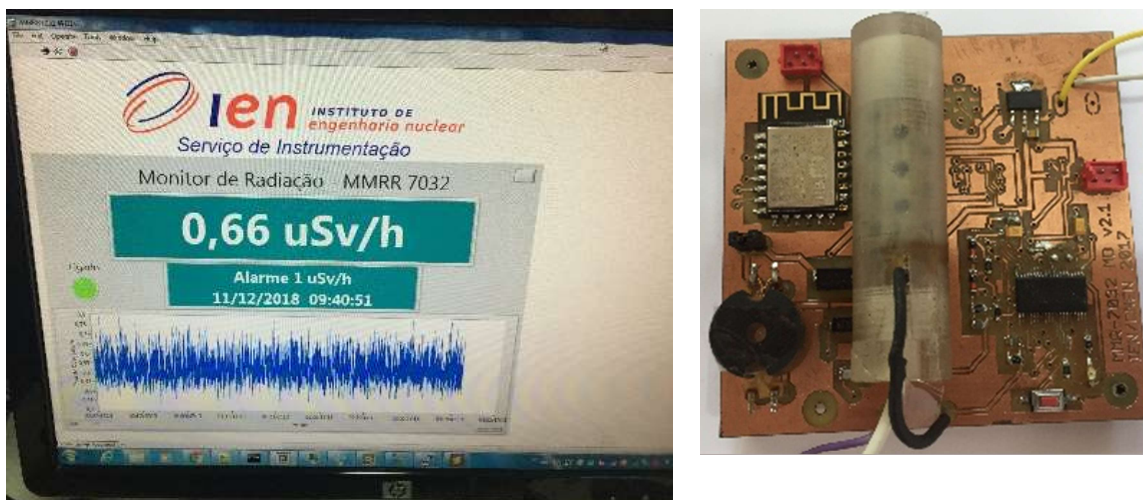


Figura 52 – Monitor de Radiação e Leitura no Computador via Sinal *Wireless*

Juntamente com a equipe do Reator de Pesquisa Argonauta, o autor sugeriu a colocação do roteador e da placa de comunicação sem fio por WI-FI/Bluetooth, modelo ESP-WROOM-32 (suporta WiFi 802.11 b/g/n e Bluetooth), dentro do gabinete do painel principal da sala de controle, que comporta os módulos eletrônicos dos monitores do reator, de tal forma a realizar um teste básico de compatibilidade eletromagnética (EMC). Como resultado, não foram observadas ocorrências de quaisquer ruídos ou alterações dos sinais/valores nos indicadores provocados por interferências eletromagnéticas ou de radiofrequências que pudessem ter sido originadas desta placa de comunicação sem fio durante a atividade (Figura 53).

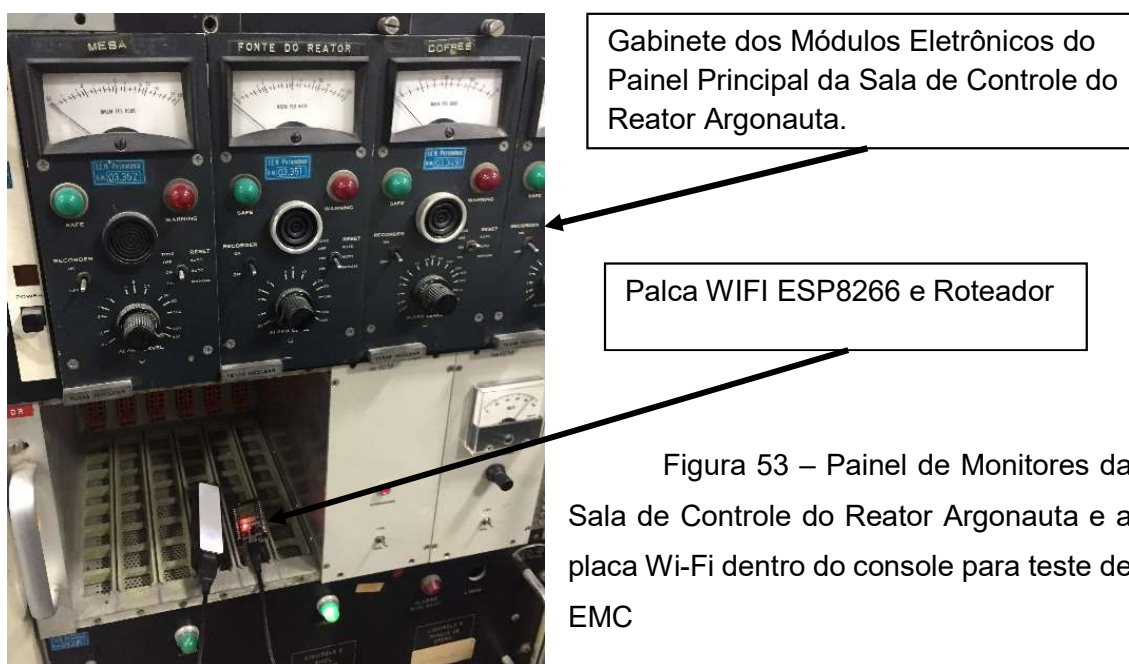


Figura 53 – Painel de Monitores da Sala de Controle do Reator Argonauta e a placa Wi-Fi dentro do console para teste de EMC

- **Na Sala de Controle do Reator de Pesquisa Argonauta** do Instituto de Energia Nuclear (IEN), localizado na Ilha do Fundão – Rio de Janeiro, sua equipe técnica instalou dentro do gabinete do painel principal da sala de controle do reator um circuito para monitoração da presença de fluxo das Bombas de Tratamento de Água de Purificação/Resfriamento, na forma de protótipo. Esse sinal é enviado através de comunicação *wireless* utilizando placa Wi-Fi ESP8266 (suporta WiFi 802.11 b/g/n) para um monitor instalado na mesa do operador da sala de controle do Argonauta, uma vez que este sinal não existia no projeto original do reator.

Com o circuito em operação e transmitindo via *wireless*, o autor juntamente com a equipe do Reator Argonauta, realizou um teste básico de compatibilidade eletromagnético (EMC) através de verificações de possíveis distúrbios de indicação nos monitores do painel principal da sala de controle. Como resultado, não foram notadas ocorrências de quaisquer ruídos ou alterações dos sinais/valores nos indicadores

provocados por interferências eletromagnéticas ou de radiofrequências que pudessem ter sido originadas deste circuito de comunicação sem fio durante a atividade da planta e no período de teste (figura 54).

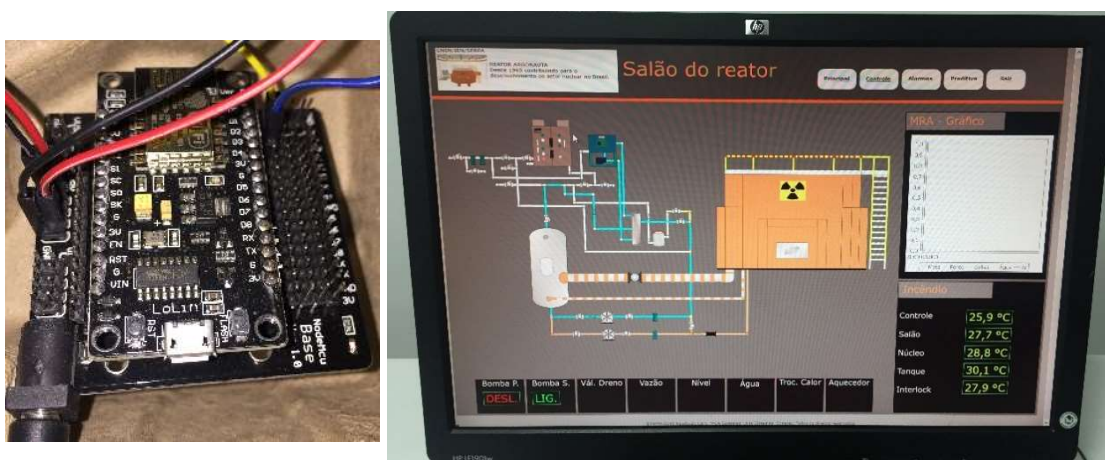


Figura 54 - Placa de comunicação Wi-Fi e monitor de presença de fluxo

Neste Reator de Pesquisa Argonauta existem outras possibilidades de aplicação da tecnologia wireless, tais como montagem de circuitos para monitoração de vibração, temperatura e outros com utilização de placa Wi-Fi, Bluetooth ou ZigBee. Adicionalmente, pode se usar as instalações para realizar testes de interferências eletromagnéticas ou por radiofrequência, assim como de confiabilidade do sinal, com a finalidade de se determinar a distância segura para zonas de exclusão e ações compensatórias, se requeridas, para a implantação de rede de sensores wireless.

5.2. Outros Exemplos de Aplicações da Tecnologia Wireless na Indústria Nuclear e em Usinas Nucleares

- **Na Central Nuclear de Catawba** – Estados Unidos das Américas, a Duke Energy está instalando tecnologia de sensores sem fio e está consolidando os dados em Charlotte, Carolina do Norte. A empresa usará a tecnologia para acompanhar de perto o desempenho e a saúde dos equipamentos, reduzindo a frequência de tarefas de manutenção e inspeção. Com base nesses testes, avaliará a confiabilidade da planta e aplicará lições em toda a sua cadeia nuclear de 11 unidades.

"À medida que ganhamos confiança com componentes não relacionados à segurança, poderemos ampliar o monitoramento automatizado para componentes mais críticos", disse Austin (EPRI). "A Comissão de Regulamentação Nuclear dos EUA – NRC recomenda que as plantas usem a inspeção em serviço com base no risco tanto

quanto possível para priorizar as atividades de manutenção, sendo que o monitoramento em tempo real pode ajudar com isso".

- **O EPRI (Electrical Power Research Institute)** está desenvolvendo aplicativos interativos com a tecnologia gráfica 3-D, que podem ser carregados em um laptop, bem como PDFs interativos com vídeos e animações incorporados. Estes podem ajudar os trabalhadores a completar as tarefas de manutenção e inspeção de forma mais eficiente e efetiva, melhorando a segurança e confiabilidade da planta.

Um aplicativo do EPRI para a Terry Turbine permite ao usuário visualizar o componente de todos os ângulos, juntamente com suas características internas e externas. Com o aplicativo EPRI para o disjuntor de linha K-Line de média tensão, os usuários podem desmontar e voltar a montar o componente na sequência apropriada, num total de 1500 componentes.

Um terceiro exemplo é a válvula acionada por ar (AOV). O aplicativo explica como a válvula funciona e como mantê-la, e fornece solução de problemas e diagnósticos para identificar causas de degradação (figura 55).

Mobile App Screen Shots



© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

17

EPRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

Figura 55 - App do EPRI para tablet com manutenção de AOV

- **A Usina Nuclear Comanche Peak** (figura 56), pertencente a empresa Luminant, vem utilizando a tecnologia wireless, conforme publicado pelo EPRI (Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica - Electric Power Research Institute) em 2014.



Figura 56 - Usina Nuclear Comanche Peak

Comanche Peak imaginou um futuro onde uma infraestrutura de telecomunicação sem fio habilitaria o fluxo de informações por toda a instalação. Hoje, a Rede de Comunicações Integradas oferece uma plataforma para comunicação por voz, rede e monitoramento da condição de equipamento [35]. O sistema utiliza o protocolo Wi-Fi, com base no padrão IEEE 802.11g, comunicando a 2,4 GHz, com segurança WPA2 e criptografia AES, que inclui detecção de erros.

A iniciativa de monitoramento sem fio pela Usina Nuclear Comanche Peak foi fundamental na criação do Centro de Otimização de Potência (Power Optimization Center – POC) da empresa Luminant.

Missão POC: Otimizar a geração, o desempenho e a confiabilidade do equipamento. A figura 57 apresenta um diagrama do Sistema Wireless de Monitoração de Equipamento em Equipamentos Não Relacionados à Segurança Nuclear (Non Safety Related). POC recebeu em 2008 o reconhecimento da contribuição a indústria nuclear do Instituto Operadores de Energia Nuclear (INPO).

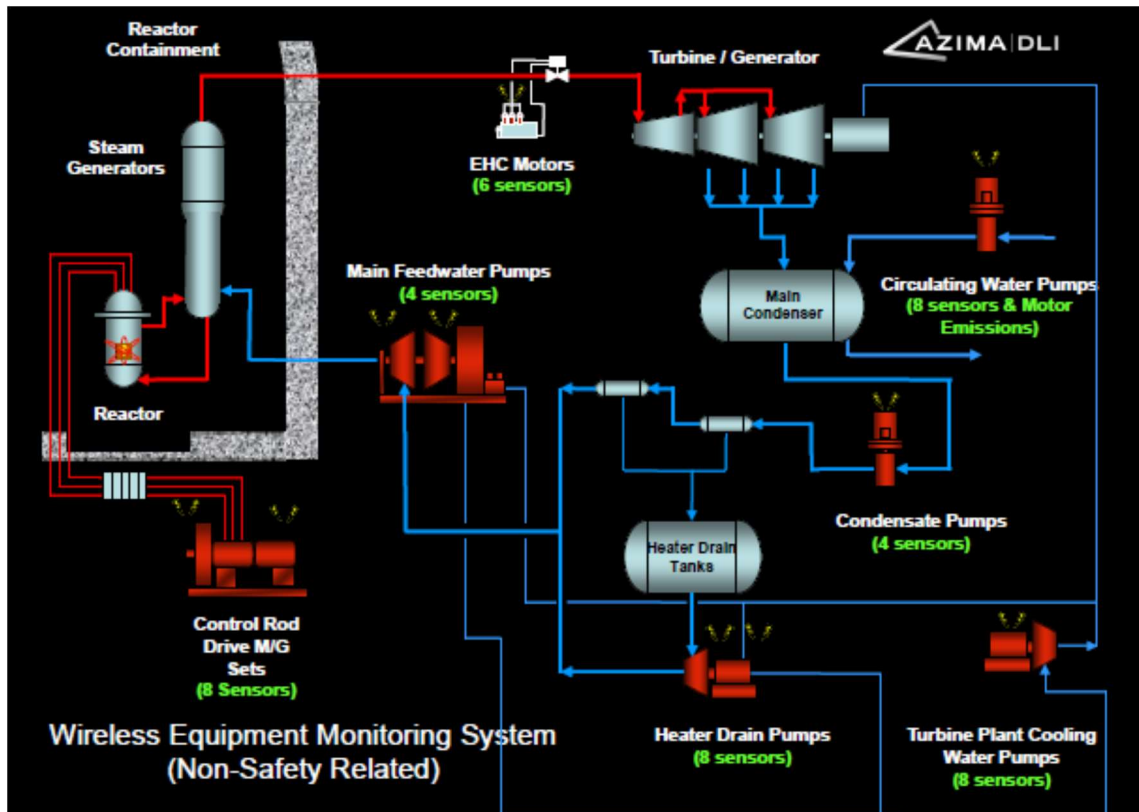


Figura 57 - Diagrama do Sistema Wireless de Monitoração de Equipamento em Equipamentos Não Relacionados à Segurança Nuclear de Comanche Peak (EPRI 2009, AZIMA DLI, Luminant 2014)

Serviços POC:

- Monitoramento Preditivo e Diagnóstico 24x7 de Equipamento Crítico, de Sistemas e do Desempenho da Usina.
- Revisão sobre a partida e resfriamento da planta.
- Tendências e Análises Químicas da Planta
- Lista de Atenção da central - Confiabilidade e desempenho
- Situação do Programa de Ação - Problemas emergentes
- Sistemas de monitoramento portáteis usando Rede Wireless interna da Usina.
- Notificações automáticas 24x7
- Gerenciamento de Operações de Emergência
- Tendência da Monitoração de Desempenho

- **O Laboratório Nacional Oak Ridge** começou a monitorar a vibração de Ventiladores da Torre de Resfriamento e também das Máquinas de Expansão de Fonte Fria (Cold Source Expansion Engines) do Reator de Isótopo de Alto Fluxo (High Flux Isotope Reactor - HFIR) com sensores de vibração sem fio, mostrado no diagrama e no gráfico de vibração da figura 58.

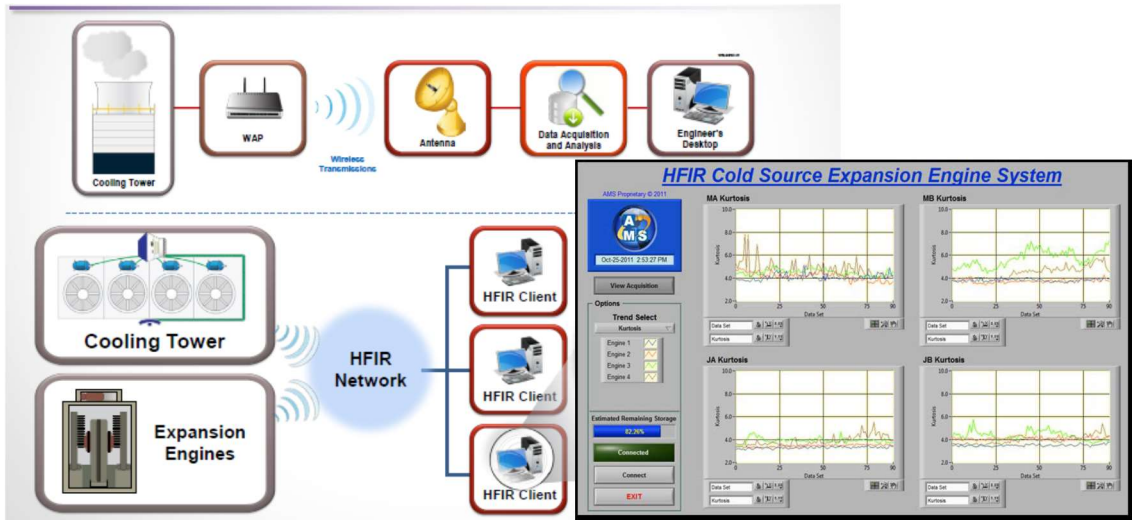


Figura 58 – Análise de Vibração das Máquinas de Expansão no HFIR (AMS, 2015)

Como resultado do monitoramento dessa vibração *wireless* constatou-se que:

- A análise mostra bom funcionamento dos 3 motores
- O 4º motor mostra níveis de vibração erráticos e altos
- A máquina falhou em serviço no ciclo operacional seguinte.

Anteriormente, o equipamento era monitorado manualmente usando um equipamento de medição de vibração portátil. Isso era efetivo, mas os custos e o esforço do trabalho desse serviço reduziam a eficiência da manutenção preditiva e a detecção precoce de falhas incipientes. Os sensores de vibração com fio poderiam ter sido instalados para fornecer monitoramento on-line contínuo do equipamento, mas não havia espaço nos eletrodutos existentes na estrutura da torre de refrigeração HFIR para acomodar fios de sensores adicionais [36].

- **A Central de Energia Nuclear Arkansas Nuclear One (ANO)**, nos Estados Unidos das Américas mostrado na figura 59, mede manualmente a vibração de seus ventiladores de refrigeração da contenção uma vez a cada nove meses para verificar se os níveis de vibração atendiam aos requisitos de especificação técnica da planta. A planta pode ser forçada a desligar dentro de 72 horas se um ou mais dos ventiladores excederem os limites de vibração.

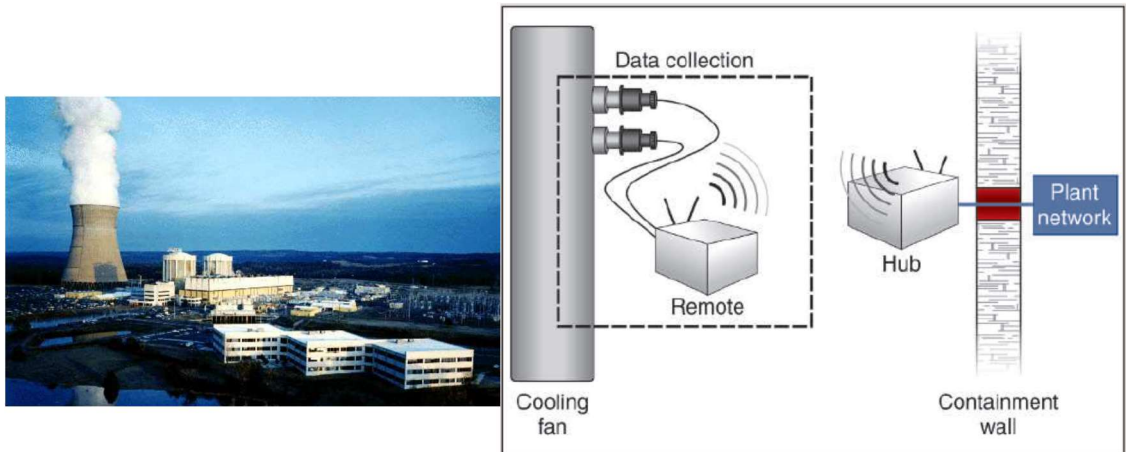


Figura 59 - Projeto conceitual do Sistema *Wireless* usado na ANO (AMS, 2013)

A empresa Analysis and Measurement Services Corporation (AMS) automatizou essas medidas instalando um sistema de monitoramento de vibração. O sistema inclui uma série de acelerômetros convencionais (montados por ímã no exterior dos tubos em torno dos ventiladores) alimentados por baterias, que foram conectados a um hub sem fio com menos de 8 metros de fio, um transmissor sem fio multicanal e um receptor colocado perto da penetração de contenção a 23 m do transmissor. Como parte da instalação, a compatibilidade eletromagnética (EMC) do sistema de monitoramento de vibração sem fio com o ambiente da planta foi estabelecida através de testes de laboratório de pré-instalação, bem como medições de EMC na planta [36].

- **Na Central de Energia Nuclear Arkansas Nuclear One (ANO)** nos Estados Unidos das Américas mostrado na figura 56, o óleo de lubrificação para as bombas de refrigerante do reator (RCP) é mantida em um tanque dentro da contenção do reator. Através do ciclo operacional de 18 meses, o óleo usado da bomba de refrigerante do reator é direcionado para outro tanque conhecido como um tanque de coleta, que fica dentro de uma bacia de concreto na contenção. Atualmente não há nenhuma maneira para a planta conhecer o nível do óleo no tanque de coleta. Se o nível estiver aumentando no tanque em caso de vazamento, isso significa que o óleo não está vazando em algum outro ponto do sistema de coleta de óleo. Os vazamentos do

sistema de coleta de óleo poderiam criar um risco de incêndio se o petróleo entrar em contato com as tubulações quentes.

A Analysis and Measurement Services Corporation (AMS) instalou um detector de nível sem fio para solucionar este problema em 2013. Um sensor parecido ao sonar usa ondas sonoras para detectar a superfície do óleo no tanque, pela medição do tempo para o som refletir de volta ao sensor, pode determinar o nível do óleo no tanque. O sensor é fechado em uma caixa de aço inoxidável (moldado) anexado ao tanque e envia um sinal por fiação para uma unidade de transmissão remota a 100 pés de distância, que então o retransmite de forma sem fio ao *hub* [36].

- **A Usina Nuclear de Vermont Yankee** de propriedade da Entergy Cor, localizada nos Estados Unidos das Américas, emprega 650 pessoas e produz 650 MW de potência. A Entergy tem como objetivo reduzir a exposição à radiação de seus funcionários para "tão baixo quanto razoavelmente possível" (as low as reasonably achievable - ALARA). Com mais de 100 medidores controlados manualmente em toda a planta, a Entergy teve várias questões a serem abordadas. Com mais de metade dos medidores localizados em áreas controladas onde a exposição à radiação é possível, a gerência de Vermont Yankee queria eliminar tantas visitas a essas áreas quanto pudesse. Finalmente, também precisava abordar o problema de medições infrequentes desses medidores com períodos de seis horas ou mais quando não havia medidas disponíveis [37].

A situação parecia feita sob medida para uma solução sem fio. Vermont Yankee fez uma parceria com a Honeywell Process Solutions para implementar e otimizar o uso da tecnologia de Leitura de Medidor Sem Fio - Wireless Gauge Reader (WGR) para reduzir a exposição à radiação e melhorar o monitoramento do sistema. O WGR é um instrumento que se acopla à frente de medidores analógicos existentes e, em seguida, transmite a leitura do medidor de forma sem fio através do protocolo Wi-Fi 802.11b/g. Ele vem com diferentes adaptadores para acomodar medidores com diferentes diâmetros e diferentes tipos de medidores, como em um painel montado, em um processo, em um "magnahelic" e o "photohelic" (figura 60).

O operador agora pode realizar a leitura do medidor em segundos a partir de qualquer rede de computadores, reduzindo tempo, erro humano e expandindo os pontos de dados do monitor do sistema, mas, o mais importante, reduzindo a exposição à radiação.



Figura 60 - Leitores de Medidores Sem Fio Honeywell (Wireless Gauge Readers) instalados em medidores na Central Nuclear Vermont Yankee. (Honeywell 2010)

Ao reduzir a necessidade de que operadores e engenheiros tenham acesso a áreas de radiação para coletar dados, a usina está habilitada a ter medidores em edifícios do Reatores e das Turbinas com tecnologia WGR, fornecendo uma ferramenta muito econômica para ajudar a alcançar as metas das indústrias nucleares de reduzir a exposição à radiação para ALARA.

A tecnologia sem fio também eliminou homens-horas desperdiçadas indo para dentro e para fora da planta. Durante a fase de teste da implementação, os WGRs da Honeywell documentaram uma economia de 730 horas por ano para uma economia de custos operacionais de US\$29.200,00. A implementação completa no futuro tem o potencial de economizar mais de 2.000 horas por pessoa e aproximadamente mais US\$90.000 nos custos operacionais anuais.

Tecnologias inovadoras que usam wireless nos WGRs nas instalações de Vermont Yankee incluem:

- Câmeras em miniatura que capturam uma imagem dos medidores - muito parecido com câmeras em celulares hoje;
- Software para calcular o ângulo da agulha do medidor e calcular uma leitura digital;
- Luzes LED para iluminar a face do medidor para que as imagens ópticas possam ser capturadas;
- Rádio Wi-Fi de ultrabaixa potência que economiza energia, permitindo que o dispositivo opere a partir de duas baterias de longa vida comercialmente disponíveis.

- **A Empresa Nuclear Coreana - Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP)**, reduziu a dose de radiação do trabalhador em 37%, monitorando a radiação remotamente, em tempo real, em experimentalmente em duas usinas nucleares na Coréia, através de um sistema pioneiro. A Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) vem desenvolvendo o sistema desde 2010, auxiliada por pesquisadores do EPRI e suas diretrizes de monitoramento de radiação.

Tradicionalmente, os trabalhadores das usinas nucleares usam dosímetros pessoais que monitoram a radiação e requerem dispositivos separados para transmitir dados ao pessoal de proteção radiológica. O sistema da KHNP integra dispositivos de monitoramento pessoal mais leves com comunicações sem fio, permitindo que pessoal de proteção radiológica rastreie os níveis de radiação em tempo real. Através de um vídeo contínuo, a equipe de proteção vê trabalhadores de manutenção das plantas, usando as comunicações de áudio integradas para informar os trabalhadores de condições anormais e fornecer instruções de segurança em tempo real (figura 61) [38].



Figura 61 - Central de Energia Nuclear da Coréia com Monitoramento de Radiação de forma remota, em tempo real

Com base nessas demonstrações bem sucedidas, a KHNP planeja implantar a tecnologia em toda a sua frota nuclear de 23 unidades. A empresa estima que o desenvolvimento do próprio sistema economizará mais de US \$ 10 milhões.

O EPRI está procurando usar os dados coletados dessas ferramentas, juntamente com seu Algoritmo de Estimativa de Campo de Radiação 3-D e uma ferramenta de análise de “termo – fonte”, para prever com precisão as taxas de dose de atividades de usina parada e estimar a dose do trabalhador em áreas onde a medição direta não está disponível. As empresas nucleares podem usar essas estimativas para aprimorar seus programas de proteção radiológica. Potencialmente, os dados podem ser combinados com ferramentas de realidade aumentada para ajudar os trabalhadores a visualizar campos de radiação, pois seu trabalho os leva a várias partes de uma planta.

- **A empresa Entergy Nuclear** adotou a mais recente tecnologia sem fio em sua Central Nuclear River Bend de potência operacional máxima de 998 MW, para modernizar com sucesso uma de suas plantas e maximizou o desempenho, economizando US\$4 milhões nesse processo [39].

River Bend substituiu um sistema de controle que tem para todas as suas áreas periféricas. O sistema tradicional seria para instalar cabos de fibra óptica. É extremamente dispendioso instalar fibras ópticas. O Grupo de Inovações da Entergy apresentou uma excelente solução de rádio. Por causa da mudança para a rede sem fio, o custo do projeto caiu de uma projeção inicial de US\$7 milhões para US\$3 milhões [39].

O projeto foi desenhado com múltiplas redes seguras redundantes para garantir alta confiabilidade. Foram instaladas duas séries de equipamentos sem fio, usando os modelos *canopy advantage* da Motorola séries 5400 series e série 5700, que operam a 5.4 GHz e 5,7 GHz, respectivamente. Com o sistema dual, se uma série falhar, ela é automaticamente alterada para o outro, por isso não há perda de dados [39].

River Bend é uma das primeiras usinas de energia nuclear a implementar tecnologia sem fio para a continuidade de um projeto de energia. Entergy Nuclear recebeu um prêmio Menção Honrosa para projetos da revista Power Engineering para os Melhores Projetos do Ano de 2009 em energia nuclear [39].

Os sistemas sem fio podem fornecer a conectividade que os operadores de rede precisam, de forma segura e econômica. As soluções ponto-a-multiponto estão amplamente implantadas hoje para transferência de dados e SCADA (Supervisory Control and data Acquisition - Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados), e o sistema pode ser instalado em uma fração do tempo que leva para instalar uma solução de rede fixa.

- **No Instituto de Energia Nuclear (IEN) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)**, pesquisadores e professores desenvolveram um projeto para o “Desenvolvimento de um sistema de prognóstico de dose móvel baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) para emergências em Usinas Nucleares de Potência com liberação de material radioativo. Como é dito no artigo de C.M.N.A. Pereira et al, publicado no Elsevier Journal, foi utilizado “Smart Phone” de plataforma Android para realizar esta experiência, que por ter recursos limitados de execução de modelos físicos complexos e de cálculos computacionais intensos, foi proposto o uso de RNA, previamente treinada com dados simulados de dispersão atmosférica gerados. Essa

simulação foi baseada em cenários hipotéticos nas vizinhanças da Central Nuclear de Angra [40].

O prognóstico da distribuição da dose devido a uma dispersão atmosférica de radionuclídeo é um item relevante para auxiliar na tomada de decisão durante uma condição de emergência de uma Usina de Energia Nuclear, em relação ao público, trabalhadores e meio ambiente.

Esse projeto móvel foi primeiramente elaborado para utilização independentemente da conexão de uma rede. A figura 62 apresenta a imagem do protótipo dessa pesquisa, mostrando a interface com o usuário.



Figura 62 - Protótipo do Aplicativo de Previsão de Dose Móvel (Claudio et al, 2017)

A Tabela 11 apresenta um quadro de aplicações de tecnologia *wireless* já implantadas e em uso em algumas usinas nucleares americanas. Pode-se observar que somente em duas usinas da tabela se realiza a monitoração de equipamentos, provavelmente explicado pelos desafios para implantação da tecnologia *wireless* nas usinas em relação às preocupações com as interferências eletromagnéticas e segurança cibernética.

Tabela 11 - Aplicação da Tecnologia *Wireless* em algumas usinas nucleares americanas (EPRI, 2009)

Usina Nuclear, Tipo, Local	Com unic. Voz	Comonic Laptop / PDA	Monitoramento de Equipamento	Monitoram . de Câmera	Dosimetria Sem Fio	Operação Equipamento Pesado	Monitoram Processo
Arkansas Nuclear One, PWR, Arkansas	X	X		X	X		
Comanche Peak, PWR, Texas	X	X	X	X			
Diablo Canyon, PWR, California	X	X			X		
Farley, PWR, Alabama	X	X		X	X		
San Onofre, PWR, California			X				X
South Texas, PWR, Texas	Em Desenvolvimento						

6. APLICAÇÃO POTENCIAL DA TECNOLOGIA *WIRELESS* NA CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA

A maioria das usinas de energia nuclear do mundo, assim como as Usinas Nucleares de Angra, são de instalações que foram construídas com projetos de mais de 30 anos atrás. Embora alguns equipamentos desta geração ainda estejam funcionando nos dias de hoje, diversas modificações de projeto têm sido adicionadas com novos equipamentos e novas tecnologias. Essa lenta velocidade de modernização deve-se a muitos fatores, incluindo a confiabilidade nos equipamentos existentes, a falta de confiança e de experiência operacional dos sistemas digitais, as considerações de financiamento e as preocupações regulatórias. No entanto, existem diversos exemplos de sucesso em usinas nucleares que promoveram melhorias, refletindo no aumento da potência de saída, na eficiência, na segurança e nas capacidades de monitoração. Nesta linha de atualização tecnológica, outras tecnologias podem proporcionar benefícios para Central Nuclear de Angra dos Reis, como a Tecnologia *Wireless*, que tem aplicação em diversas áreas.

A tecnologia *Wireless* enfrenta alguns obstáculos percebidos para implementação, incluindo segurança cibernética, confiabilidade, retorno sobre o investimento e compatibilidade eletromagnética, ambiente nuclear severo (radiação, temperatura, umidade etc.). Outra questão que tem surgido é a coexistência de instalações com fio com a tecnologia sem fio. No entanto, usinas nucleares são

tipicamente lentas para adotar tecnologias de ponta. Por conseguinte, os protocolos e os dispositivos de sensores sem fios avançados que estão sendo desenvolvidos hoje e num futuro próximo terão de fornecer justificativas suficientes para abordar as preocupações de implementação.

Como pode ser visto nas seções anteriores, diversos exemplos de pesquisa, experiências e aplicações tem sido implementados em usinas de todo mundo. Portanto, existe um grande potencial de aplicação na CNAAA (Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto), seja na área externa em Prédios de Monitoração, Armazenamento de Rejeitos, Armazenamento de Combustível Usado (novo), assim como em Prédios no interior das Usinas, para monitoração de condições equipamentos (análises de vibração e outros), alarmes diversos, auxilio de instalações provisórios em paradas (câmeras de vídeo, monitorações/controles temporárias etc.), área de segurança física e assim por diante (figura 63).

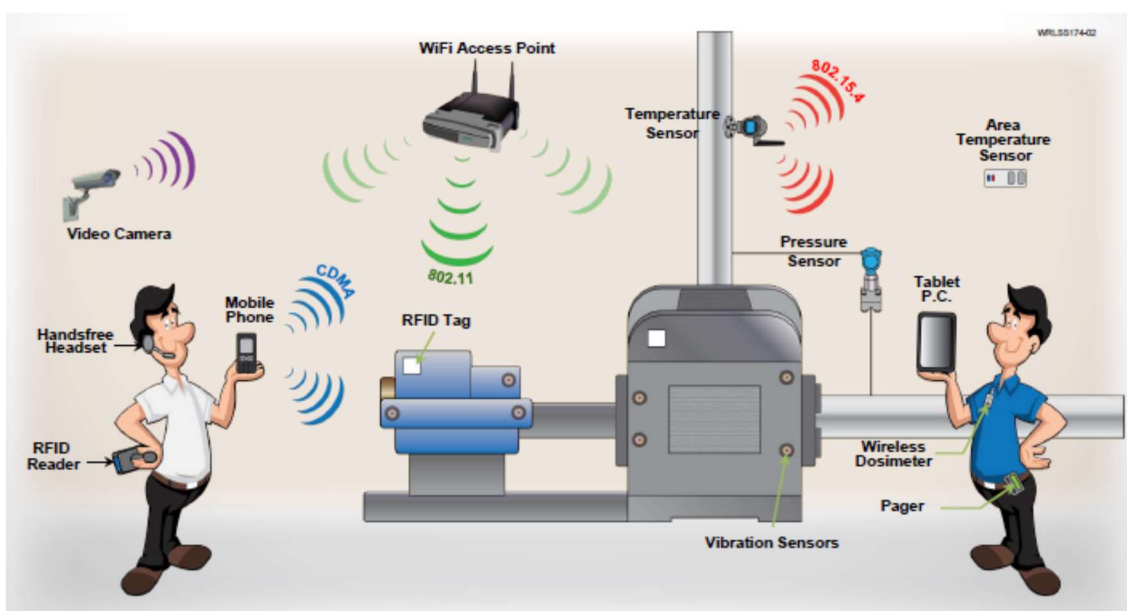


Figura 63 - Aplicações de Monitoração com Tecnologia Wireless em Usinas Nucleares de Potência (AMS, 2015)

O Programa de Confiabilidade de Equipamentos das Usinas Nucleares, incluindo as unidades de Angra, que usa como base o monitoramento de condição operacional de equipamentos rotativos, pode melhorar muito o programa de manutenção preditiva com a implantação provisória ou definitiva de uma rede de sensores *wireless* para medição de vibração e temperatura.

Como abordagem inicial, a Central Nuclear pode iniciar o uso da tecnologia *wireless* no monitoramento do Prédio de Armazenamento a Seco para Combustíveis Usados (radiação e temperatura) e no aumento de monitoração de condições

operacionais dos equipamentos rotativos das usinas (principalmente vibração e temperatura). Somente estas duas iniciativas reduziria em muito os custos de implementação com redes cabeadas, horas de dedicação de engenharia, dose de radiação para equipamentos na área controlada, assim como permitiria acesso a dados em tempo real e online dos pontos de mídia habilitados da planta para tomada de ações proativas, evitando falhas catastróficas ou paradas das plantas.

A tabela 12 apresenta uma lista de potenciais e possíveis aplicações de tecnologia wireless em usinas nucleares, onde se pode incluir a Central Nuclear de Angra.

Tabela 12 - Exemplos de Potenciais Aplicações Wireless em Usinas Nucleares (EPRI, 2009)

Sistemas da Usina Nuclear	Medição Wireless (sem fio)	Aplicação
Trocadores de Calor	Temperatura	Monitorar a temperatura ambiente para considerar os fatores dos efeitos sazonais das mudanças meteorológicas.
Válvulas do Lado Secundário	Indicação de Posição	Substituir a trabalhosa medição periódica de posição de válvula com medição sem fio continuamente.
Entrada da Tomada de Água	Nível, Temperatura e Fluxo (Vazão)	Monitorar fatores que afetam a performance devido a mudanças no nível, variação sazonal de temperatura, fluxo de tomada de água.
Equipamentos Rotativos (bombas, válvulas, motores, compressores, ventiladores)	Temperatura, Vibração, Corrente do Motor	Monitorar as Temperaturas, assinaturas comportamentais da vibração, flutuações de carga para avaliar as condições e melhorar o desempenho.

Geradores Diesel	Temperatura, Nível Vibração, Corrente do Motor	Ampliar as leituras dos sensores existentes para fornecer redundância e avaliação abrangente do desempenho.
Cascos de Armazenamento a Seco de Combustível Usado	Radiação e Temperatura	Eliminar a necessidade de conduíte e cabeamento subterrâneo para monitorar temperatura e radiação com sensores sem fio.
Estação Meteorológica	Temperatura, Velocidade e Direção do Vento, Pressão Umidade etc.	Melhorar a monitoração pela substituição equipamentos de falha provável e cabeamento com medições wireless.

Para realizar qualquer projeto de implantação com rede e sensores wireless na Central Nuclear de Angra, deverão ser realizadas as seguintes ações:

- Avaliar os protocolos e padrões da rede de transmissão de dados sem fio aplicáveis aos projetos demandados;
- Selecionar fabricantes de sensores wireless e com experiência de redes implantadas em indústria nuclear ou com características de confiabilidade e segurança similares;
- Disseminação do conhecimento da tecnologia wireless no site para desfazer percepções negativas e obstáculos a implantação dessa tecnologia;
- Elaborar os cenários e protótipos para testes em laboratório e no campo;
- Avaliar a coexistência entre os equipamentos instalados e a nova tecnologia wireless;
- Analisar as diferentes criptografias e formas de proteção dos sinais transmitidos;

- Medir ou confirmar as zonas de exclusão de compatibilidade eletromagnética conforme guias do EPRI;
- Análise em campo da cobertura de RF para implantação de uma rede sem fio;
- Determinar a quantidade de Access Points e antenas necessários para atender a cobertura necessária.
- Determinação dos tipos de Antenas;
- Algoritmos de aquisição e qualificação de dados;
- Quantificar, onde possível; os parâmetros de:
 - Confiabilidade;
 - Latência;
 - Segurança;
 - Taxas de transmissão e de atualização dos dados nos sensores;
 - Consumo de energia;
 - Alcance da transmissão sem fio;
 - Interferências Eletromagnéticas e de Rádio transmissão entre os equipamentos da usina, sensores, antenas e portais wireless;
 - Intensidade e qualidade de sinal entre os pontos de interesse;
 - Taxa de Erros de Bit, Taxa de Erro do Pacote de Bits, Integridade Total dos Dados;
- Pontos de desafios a considerar:
 - Temperaturas elevadas;
 - Alto índices de partículas suspensas no ar;
 - Interferências Eletromagnéticas e radio transmissão;
 - Áreas de Sombra;
 - Áreas de radiação;

- Segurança Cibernética;
- Treinamento da equipe de manutenção, operação e de engenharia na análise de dados sem fio e rotinas de interpretação.
- Características da alimentação disponível nos pontos onde serão instalados os equipamentos.

Quando aplicável, deverá ser providenciada a Homologação junto à Anatel para os equipamentos wireless, que não operam nas faixas de frequência destinadas ao uso industrial, científico e médico (ISM – Industrial, Scientific and Medical), que compreendem basicamente as faixas de 900 MHz, 2,4 GHz e 5,8 GHz. Caso o equipamento escolhido trabalhe em outras faixas de frequências, será necessário verificar se requererá um licenciamento referente a elas junto à Anatel.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como pode ser visto nos exemplos das seções anteriores, diversos exemplos de pesquisa, experiências e aplicações com a tecnologia *wireless* tem sido implementadas em usinas nucleares de todo mundo com bom resultado nas capacidades de monitoração em tempo real e *online*, com o consequente aumento da confiabilidade e segurança. Além disso, existe um grande potencial de aplicação nas Usinas Nucleares de Angra, tanto em prédios externos do bloco nuclear (Edifícios de Monitoração, de Armazenamento de Rejeitos, de Armazenamento de Combustível Usado), quanto em prédios no seu interior para monitoração de condições operacionais de equipamentos (análises de vibração, temperatura e outros), alarmes diversos, auxílio de instalações provisórias em paradas (câmeras de vídeo, monitorações/controles temporárias etc.), área de segurança física e assim por diante.

Foi mostrado também, que para tornar viável o uso da tecnologia wireless no interior das usinas nucleares, devem ser realizados testes locais e em laboratórios de interferências eletromagnéticas e de radiofrequência, de qualidade do sinal e de coexistência antes de se projetar a implementação de um sistema *wireless*, de tal forma a determinar as zonas de exclusão e da escolha da melhor tecnologia aplicável.

É importante observar que os resultados dos testes da implantação da tecnologia wireless de outras plantas não são diretamente aplicáveis, devido às características particulares de cada instalação nuclear, tanto em relação ao leiaute das estruturas físicas quanto aos tipos de equipamentos.

A metodologia e estratégia estabelecidas para este trabalho de realizar pesquisa da melhor tecnologia *wireless* aplicável, de conhecer os resultados e os desafios da implantação na indústria nuclear, além executar testes básicos de operabilidade e de interferências eletromagnéticas em dispositivos wireless no Reator de Pesquisa Argonauta (IEN), se mostraram apropriadas para poder concluir a viabilidade para utilização da tecnologia *wireless* no monitoramento de condições operacionais de motores em usinas nucleares, uma vez que existem alternativas tecnológicas para ultrapassar os desafios atualmente existentes para sua implementação.

Mesmo embora sendo lenta a velocidade de digitalização das usinas nucleares de potência, o uso de novas tecnologias digitais e *wireless* é imperiosa para manter economicamente a alta qualidade operacional das usinas de energia nuclear do mundo, considerando que a maioria (incluindo as Usinas Nucleares de Angra – Brasil) foram construídas com projetos e tecnologia de mais de 30 anos atrás, além de uma boa parte destas usinas internacionais já terem tido a sua licença de operação estendidas para mais 20 anos. Inclusive a Usina Nuclear Angra 1 está trabalhando no sentido de estender a sua licença de operação por mais 20 anos, uma vez que a licença original tem prazo e validade até 2024 (Eletronuclear, 2019).

Baseado na estratégia e metodologia que foi estabelecida, e pensando numa recomendação para continuidade deste trabalho, o autor realizou testes básicos com montagem experimental no Laboratório de Monitoração de Processos (LMP) - Programa de Energia Nuclear (PEN) – COPPE – UFRJ. Esses testes foram realizados utilizando-se microcontrolador (tipo Arduino Uno), módulo de comunicação Zigbee (XBee) e sensor de vibração (acelerômetro de modelo MPU-6050 – módulo GY-521), de tal forma a criar um monitoramento de condição operacional de motores por Sensores *Wireless*. O acelerômetro foi instalado na carcaça de um motor com a finalidade de monitorar suas condições operacionais, principalmente vibração e temperatura, e observando-se a qualidade da medição, conforme mostrado na figura 64.

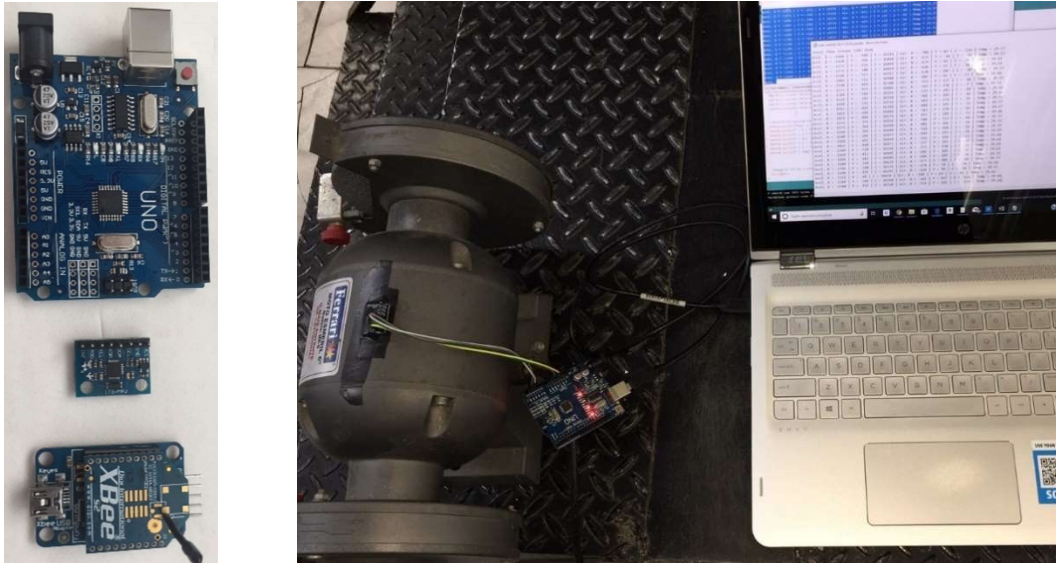


Figura 64 - Módulos Arduino UNO, acelerômetro MPU-6050 e comunicação *wireless* Zigbee. Teste básico de funcionamento dos componentes.

O sucesso da continuidade deste trabalho dependerá de uma configuração mais detalhada com arranjos e simulações que possibilitem avaliar a qualidade do sinal sob diversas situações, para uma potencial implantação para monitoração de condição operacional de máquinas rotativas nas Usinas Nucleares de Angra, principalmente daquelas que poderão causar perda de geração ou desligamentos não programados. Adicionalmente, poderá ser realizado um outro teste em laboratório, utilizando um Transmissor Diferencial da marca Foxboro modelo E13DM de tecnologia dos anos 70 e muito sensíveis a interferências eletromagnéticas e por radiofrequência, que foi removido de serviço da Usina Nuclear Angra 1.

REFERÊNCIAS

1. Electric Power Research Institute – EPRI, *Implementation Guideline for Wireless Networks and Wireless Equipment Condition Monitoring*, Palo Alto, 1019186, CA, 2009.
2. Hashemian, H. M., *What you need to know about sensor reliability before and after an accident - wireless*, International Atomic Energy Agency – IAEA, TWG NPPIC Meeting IAEA, 2013.
3. Santana, D., *Comunicação Industrial Wireless IEEE 802.11 a/b/g/n*, Advantech Brasil, Nov 2013.
4. International Atomic Energy Agency – IAEA, *PRIS Miscellaneous reports Operational by Age*, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx>, 2019, acessado em 01.02.2019.
5. World Nuclear Association, *World Nuclear Performance Report 2018*, Published: August 2018.
6. Boles, G., *A Nuclear Transition to Online Monitoring Focus on Cost Reduction and Automation*, Electric Power Research Institute, University of Tennessee, MARCON Conference, March 14-15, 2018.
7. Lowe, C.L., Kiger, C.J., *Strategy for Implementation of Wireless Technologies in the Electromagnetic Environment of Nuclear Power Plants*, Analysis and Measurement Services (AMS) Corporation, TN, 2016.
8. Hashemian, H.M., *et al.*, *Wireless Technology*, Analysis and Measurement Services Corporation, Analysis and Measurement Services Corporation, Nuclear Plant Journal, March-April 2015.
9. Electric Power Research Institute – EPRI, *Revised Guidelines for Wireless Technology in Power Plants Volume 1: Benefits and Considerations*, 1013485 Final Report, December 2006.
10. ANSLEY, B., *Wireless in Nuclear at Exelon Digital Plant Innovation Presentation*, Exelon Generation, 2018, disponível em https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/24312/11-exelon_ansley.pdf, acessado em 14.02.2019.
11. Werb, J., International Society of Automation - ISA Publications, *ISA100 Wireless Applications, Technology, and Systems*, A Tutorial White Paper, 2014, <https://isa100wci.org/en-US/Documents/White-Papers/White-Paper-ISA100-Applications-Technology-and-Sys.aspx>, acessado em 03.02.2019.
12. Viswanathan, M., *Yokogawa in Wireless Technologies & Solutions*, Frost & Sullivan's perspectives in Yokogawa User Conference, Berlin, 2-4 July 2014.

13. Andrade, F., *Instrumentação WirelessHART: Segurança dos dados e coexistência com outros protocolos sem fios na indústria*, Automação Industrial, , <https://www.automacaoindustrial.info/instrumentacao-wirelesshart-seguranca-dos-dados-e-coexistencia-com-outros-protocolos-sem-fios-na-industria/>, 2015.
14. Hashemian, H. M., Kadri, A., *Wireless Technology Applications in Nuclear Power Plants*, presented to IAEA TWG NPIC, Analysis and Measurement Services Corporation, TN, QU Wireless Innovations Center (QUWIC), Qatar Science & Technology, Doha, May 24-26, 2011.
15. Electric Power Research Institute - EPRI, *A WIRELESS EYE IN NUCLEAR PLANTS*, Journal July/August No. 3 | 6, disponível em <http://eprijournal.com/a-wireless-eye-in-nuclear-plants/>, 2017.
16. Canavan, K., *Reducing Nuclear Plant Operations and Maintenance Costs Through Online Monitoring*, EPRI, Connected Plant Conference, Distributed Energy Conference, 12/01/2017.
17. Nuclear Energy Institute (NEI), *Cyber Security for Nuclear Power Plants*, Policy Brief, July 2016.
18. Electric Power Research Institute – EPRI, *Guidelines for Electromagnetic Compatibility Testing of Power Plant Equipment: Revision 4 to TR-102323*, EPRI, CA, 3002000528, 2013.
19. Lowe, C.L., Kiger, C.J, Jackson, D. N., Young, D. M., *Implementation of Wireless Technologies in Nuclear Power Plants' Electromagnetic Environment Using Cognitive Radio System*, Analysis and Measurement Services, TN, NPIC&HMIT, CA, June 11-15, 2017.
20. Lowe, C.L., Kiger, C.J., Ansley, W., Watters, A., *Using a Cognitive Radio System to Support Wireless Technology Implementation at Nine Mile Point*, Analysis and Measurement Services (AMS) Corporation, Exelon Generation, Nine Mile Point Nuclear Station, 2012.
21. Kiger, C., *Wireless Technology Implementation in Nuclear Power Plants / Overview of Wireless Technology Implementation*, presented by AMS Corporation, 2015.
22. Phoenix Contact Ind. Com. Ltda, *Funcionamento paralelo de soluções sem fio*, disponível em https://www.phoenixcontact.com/online/portal/br?1dmy&urile=wcm%3apath%3a/brpt/web/main/products/technology_pages/subcategory_pages/Industrial_wireless_coexistencia/82c433f4-93dc-4ed0-b273-b94675e2343f, 2015.
23. Lowe, C.L., Kiger, C.J., Ansley, W., Watters, A., *Assessing the EMI/RFI Risks of Wireless Devices Using a Cognitive Radio System*, Analysis and Measurement Services

Corporation, TN, Exelon, PA 19348, Nine Mile Point Nuclear Station, NY, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 118, Philadelphia, Pennsylvania, June 17–21, 2018.

24. Lia, L., Wangb, Q., Barib, A., *et al.*, *Field test of wireless sensor network in the nuclear environment*, aecl nuclear review vol 3, number 1, June 2014.

25. Emerson Process Management, *System Engineering Guidelines*, IEC 62591 WirelessHART®, 00809-0100-6129, Rev AB, February 2016.

26. Electric Power Research Institute – EPRI, *Self-Actuating Condition Monitoring Sensor Network and Energy Harvesting Sensors Smart Networks*, 1016704, Technical Update, December 2008.

27. Emerson Electric Co, *Industrial Wireless Technology*, disponível em <https://www.emerson.com/en-us/expertise/automation/industrial-internet-things/pervasive-sensing-solutions/wireless-technology>, 2017.

28. Bondoc, E., *Wireless technology revolutionizes condition monitoring*, SKF, 2018, <https://www.reliableplant.com/Read/16973/wireless-technology-revolutionizes-condition-monitoring>, acessado em 01.02.2019.

29. International Atomic Energy Agency – IAEA, *Advanced Surveillance, Diagnostic and Prognostic Techniques in Monitoring Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants*, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-3.14, VIENNA, 2013.

30. RALSTON, J., *Wireless condition monitoring*, PROSOFT TECHNOLOGY, White Paper, February 2007.

31. Hashemian, H.M., *Wireless sensors for predictive maintenance of rotating equipment in research reactors*, Analysis and Measurement Services Corporation, AMS Technology Center, TN, USA, *Annals of Nuclear Energy* 38 (2011) 665–680, 2011.

32. Hashemian, H.M., *Advanced monitoring for LWR sustainability*, Nuclear Engineering International, disponível em <https://www.neimagazine.com/features/featureadvanced-monitoring-for-lwr-sustainability-5802569/>, 9 May 2017.

33. Hesler S., *Connected Plant Conference, Wireless Sensor Technology Measures Torsional Shaft Vibration in Turbine Generators*, Electric Power Research Institute, Inc. – EPRI, (<https://www.powermag.com/category/connected-plant/>), 2016.

34. International Atomic Energy Agency – IAEA, *ON-LINE MONITORING FOR IMPROVING PERFORMANCE OF NUCLEAR POWER PLANTS PART 2: PROCESS AND COMPONENT CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTICS*, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-1.2 INTERNATIONAL, VIENNA, 2008.

35. Carter, C.E., *Advanced Monitoring and Diagnostics: Experience at Luminant and the Benefits of Nuclear Industry Collaboration*, Electric Power Research Institute - EPRI, Equipment Reliability Action Plan Committee, Luminant, Illinois, August 27, 2014.
36. Hashemian H.M., *Reactors go wireless*, Analysis and Measurement Services Corporation – AMS, Nuclear Engineering International magazine, 2013, <http://www.neimagazine.com/features/featurereactors-go-wireless-4146854/>, accessed in 13/04/2018.
37. Honeywell International Inc, *Entergy Nuclear Plant Improves Safety, Increases Efficiency and Reduces Costs with Honeywell Wireless Gauge Monitoring System*, 2010.
38. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, INC – EPRI, *Monitoring Radiation Remotely, in Real Time*, EPRI Journal R&D QUICK HITS <http://eprijournal.com/monitoring-radiation-remotely-in-real-time/>, 2017.
39. Entergy Nuclear, *Opting for Wireless Technology - Entergy Nuclear finds security and reliability in new system*, <https://www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-2/features/opting-for-wireless.html>, Power Engineering Magazine, 02/01/2010.
40. Pereira, C., Schirru, R., Gomes, K., Cunha J., *Development of a mobile dose prediction system based on artificial neural networks for NPP emergencies with radioactive material releases*, Elsevier Journal, Annals of Nuclear Energy 105 (2017) 219–225, disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454917300646>.
41. Electric Power Research Institute, Inc. – EPRI, *Guidelines for Electromagnetic Interference Testing of Power Plant Equipment Revision 2 to TR-102323*, 1000603, 2000.
42. Jackson, D.N., Woods, J.L., Kiger, C.J., *Evaluating Distributed Antenna Systems for Nuclear Power Plants*, Analysis and Measurement Services (AMS) Corporation, 2018.
43. Ferguson, S.G., *Electromagnetic Compatibility (EMC) for Equipment Qualification EPRI TR-102323 R4*, presented by Washington Laboratories, Ltd., 2015
44. Hesler S., *A Real-Time Eye on Turbines*, Electric Power Research Institute, Inc. – EPRI JOURNAL, November/December 2016.
45. Kiger J.C., Steve W.J., Hashemian H.M., Hudson E.K., *Harnessing Wireless Data from the Containment of a Nuclear Power Plant*, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine October 2013, 1094-6969, 2013.
46. Kiger, C.J., Shumaker, B.D., *Managing the Electromagnetic Compatibility and Wireless Coexistence Concerns for the Implementation of Existing and Future Wireless*

Technologies in Nuclear Power Plants Analysis and Measurement Services Corporation, AMS Technology Center, TN, IEEE, 2012.

47. Hashemian, H.M., *State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques*, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 60, NO. 1, January 2011.

48. International Electrotechnical Commission - IEC, *USE AND SELECTION OF WIRELESS DEVICES TO BE INTEGRATED IN SYSTEMS IMPORTANT TO SAFETY TR 62918:2014 Edition 1.0*, Nuclear Power Plants – Instrumentation and Control Important to Safety, 2014.

49. Looney, M., *An Introduction to MEMS Vibration Monitoring*, Analog Dialogue, VOL 48, JUN 2014, <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/intro-to-mems-vibration-monitoring.html>, acessado em 05.02.2019.

50. U.S. Nuclear Regulatory Commission - NRC, *REGULATORY GUIDE 1.180 GUIDELINES FOR EVALUATING ELECTROMAGNETIC AND RADIO-FREQUENCY INTERFERENCE IN SAFETY-RELATED INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS Revision 1*, October 2003.

51. Dion, J., Howlader, M.K., Ewing P.D., *ISSUES ASSOCIATED WITH DEPLOYING WIRELESS SYSTEMS IN NUCLEAR FACILITIES*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Oak Ridge National Laboratory, NPIC&HMIT 2010, November 7-11, 2010, Las Vegas, Nevada, 2010.

52. Reese, L., *RF Wireless Technology Industrial Wireless Sensor Networks*, Mouser Electronics, <https://br.mouser.com/applications/rf-sensor-networks/>, 2014.

53. Hashemian, H.M., Tsvetkov, P., *Nuclear Power Plant Instrumentation and Control, Nuclear Power - Control, Reliability and Human Factors*, ISBN: 978-953-307-599-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/nuclear-power-control-reliability-and-human-factors/nuclear-power-plantinstrumentation- and-control>, 2011.

54. Mignano, F., Ristaino, A., *Condition Monitoring System*, SKF Multilog WVT, ISA100 WCI, Presentation, 2015.

55. Korsah, K., Holcomb, D.E., Muhlheim, M. D, *et al.*, *Instrumentation and Controls in Nuclear Power Plants: An Emerging Technologies Update*, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Nuclear Regulatory Commission - NRC, 2008.

56. Schneider Electric, *A Quantitative Analysis of the ZigBee Wireless Standard*, 2015.

57. Dion, J. et al., *Wireless Network Security in Nuclear Facilities*, Presented at 5th International Conference on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC &HMIT), Las Vegas, NV, November 2010.