

DESENVOLVIMENTO E TESTE DE UMA SMARTBOX VERSÁTIL PARA O CHÃO DE FÁBRICA

Pedro Miguel Baptista Torres^{1*} e Rogério Pais Dionísio^{1,2}

1: Escola Superior de Tecnologia
Instituto Politécnico de Castelo Branco
Avenida do Empresário, S/N
6000-767 Castelo Branco
Portugal
e-mail: pedrotorres@ipcb.pt, web: <http://www.ipcb.pt>

2: Allbesmart, Lda.
Centro de Empresas Inovadoras
Avenida do Empresário, nº1
6000-767 Castelo Branco
Portugal
e-mail: rdionisio@allbesmart.pt, web: <http://www.allbesmart.pt>

BIOGRAFIA

Pedro Miguel Baptista Torres é membro Efetivo da Ordem dos Engenheiros, colégio de eletrotécnica, Professor Adjunto na Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco (IPCB) e vice-coordenador do curso de Engenharia Industrial. Bacharel e Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e das Telecomunicações em 2005 e 2007 respetivamente pelo IPCB. Doutorado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa em 2015. Tem mais de 50 publicações em encontros científicos, revistas científicas com circulação internacional, conferências Nacionais e Internacionais, livros e capítulos de livro.

Rogério Pais Dionísio é doutorado em Engenharia Eletrotécnica pela Universidade de Aveiro. Desde 1999, é professor no Instituto Politécnico de Castelo Branco, onde coordena a Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e das Telecomunicações. É membro sénior e especialista em Telecomunicações da Ordem dos Engenheiros, da qual recebeu o prémio “Novas Fronteiras da Engenharia” em 2015. É sócio fundador da Allbesmart, uma empresa de base tecnológica criada em 2015. É investigador no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, desde 2006. A sua pesquisa relaciona-se com rádios cognitivos, a Internet das Coisas e redes de sensores inteligentes.

RESUMO

O surgimento de várias inovações tecnológicas permitiu a digitalização e a transformação da indústria, acompanhando o paradigma da Indústria 4.0. Tecnologias ligadas à robótica, aos sensores inteligentes, ao fabrico assistido por computador, à Internet das Coisas ou à Inteligência Artificial permitem a interligação entre os mundos físicos e virtuais. A interoperação entre todos estes domínios do saber é o princípio para transformar o processo de produção e criar uma fábrica inteligente.

O foco deste artigo centra-se no desenvolvimento e teste de uma smartBox, capaz de comunicar eficientemente com os equipamentos no chão de fábrica e integrá-los em plataformas de IIOT (*Industrial Internet of Things*). À smartBox estão acopladas cartas e módulos de sensores e atuadores adequados às especificidades de cada máquina. Esta tem de ser capaz de operar em tempo-real, ter uma boa performance e escalabilidade e bons canais de comunicação. O hardware da smartBox tem, por isso, de ser robusto, flexível, escalável, funcional, suportar diferentes tecnologias e permitir atualizações futuras, características essenciais a uma disseminação do conceito de Indústria 4.0 no chão de fábrica.

Atualmente, existe no mercado uma diversidade de plataformas de hardware capazes de suportar o desenvolvimento da smartBox e servir de Gateway com qualquer equipamento no chão de fábrica. Por sua vez, os controladores lógicos programáveis e as suas plataformas de programação atuais são cada vez mais versáteis e intuitivos de programar, facilitando o processo de desenvolvimento, no sentido em que cada equipamento do chão de fábrica tem a sua especificidade, processo e tecnologia.

Dado que muitas instalações industriais têm alguns anos de existência, por vezes as linhas de comunicação andam a par com as linhas de potência e é necessário prestar atenção às questões das interferências e formas de as minimizar. Nesse caso, os protocolos de comunicação a utilizar devem corresponder aos requisitos necessários em comunicações industriais, tal como a redundância, tolerância a interferências, reduzida latência, e minimizar as retransmissões e a perda de pacotes de dados.

Nesse âmbito, apresentamos um caso de estudo em que é analisada a vibração de um motor elétrico; testamos duas soluções distintas para a smartBox: uma é baseada num sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, onde o software LabVIEW é usado para adquirir, processar e armazenar os dados num servidor OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*). A outra solução incorpora as plataformas Arduino e EtherCAT. As características de ambas as propostas são analisadas e comparadas.

INTRODUÇÃO

As fábricas estão em contínua evolução devido às tecnologias emergentes e às inovadoras formas de processar informação, que passam pelo uso de sistemas de computação e automação, pelo processamento de grandes quantidades de informação (*Big Data*), digitalizando a indústria e criando uma rede inteligente e autônoma. Esta alteração oferece um aumento de eficiência na produção, em menos tempo, com menos esforços durante a configuração, reconfiguração, redução de custos de produção e aumento da qualidade do produto. Neste setor, a Indústria 4.0 é a atual tendência de automação e troca de dados em tecnologias de produção e fabrico. Inicialmente, foi desenvolvido pelo governo alemão para criar um quadro político coerente para manter a competitividade industrial da Alemanha. Outros termos utilizados internacionalmente incluem a Internet das coisas (IOT), Internet de Serviços, Internet Industrial (I-IOT), Fabricação Avançada ou Fábrica Inteligente [1]. Presentemente, a introdução da Internet de Coisas e de Serviços no chão de fábrica e nos processos de produção acompanha par-a-par a quarta revolução industrial [2]. Este artigo examina os desafios da adoção da I-IOT nas fábricas, procurando implementar novas aplicações e serviços e criar sistemas de produção mais eficientes. Vários estudos, projetos e empresas concentram a sua atenção neste novo paradigma. O artigo faz um levantamento do estado da arte relacionado com I-IOT e sistemas de produção ciberfísicos (CPS). Algumas soluções industriais para IOT também são apresentadas, provenientes de empresas da área dos sistemas de energia e de tecnologia de automação. Além disso, o artigo descreve um caso prático. O objetivo principal deste caso de estudo é medir a vibração de motores elétricos e transmitir a informação para uma smartBox, e avaliar eventuais anomalias. Para tal, são usadas diferentes plataformas e tecnologias: hardware LabVIEW e NI DAQ, plataforma Arduino, servidor OPC e protocolo de comunicação EtherCAT.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Primeiro, um fundo de revolução industrial ao longo dos anos e como está indo para o setor 4.0. A segunda seção apresenta uma visão geral sobre CPS e smartBox. Um estudo de caso também está descrito, os seus benefícios e possíveis melhorias. Finalmente, são apontadas as conclusões.

ESTADO DA ARTE DA INDÚSTRIA 4.0

Sistemas ciberfísicos

Nas fábricas do futuro, os mundos físicos e virtuais estão cada vez mais interligados, através dos Sistemas ciberfísicos (CPS), conjugando Internet das Coisas, Dados e Serviços. São sistemas físicos cujas operações são monitorizadas, coordenadas, controladas e integradas por um sistema computacional e de comunicação [4].

Os sistemas ciberfísicos estão a ser desenvolvidos como parte de um mundo ligado em rede, em que produtos, equipamentos e objetos interagem através de hardware e software embebido, com múltiplas aplicações. Com a ajuda de sensores, esses sistemas processam dados do mundo físico e disponibilizam-nos para serviços de rede, que por sua vez podem ter um efeito direto sobre os processos no mundo físico usando atuadores [5].

Um CPS pode funcionar em três modos diferentes: passivo, semi-ativo e ativo [6]:

1. Modo passivo: um CPS passivo monitoriza o ambiente, recolhe e processa dados.

2. Modo semi-ativo: neste modo, um CPS monitoriza o ambiente e de forma indireta realiza uma ação alterando seu próprio comportamento para satisfazer critérios pré-determinados do processo físico.
3. Modo Ativo: um CPS ativo executa uma atuação direta, modificando o comportamento do processo físico para satisfazer a critérios pré-determinados desse processo.

Para os CPS, o papel da smartBox simplifica muito o processo de recolha de dados sensoriais e de dados do estado de funcionamento dos equipamentos. Esta informação é enviada pela Internet para os gestores da fábrica e utilizadores autorizados [4]. Uma smartBox inteligente executa várias tarefas, como por exemplo, recolher dados e realizar pré-processamento, filtrar dados e reconstruindo-os num formato mais útil, enviando apenas os dados necessários para os sistemas de computação em nuvem. Deve monitorizar a atividade e o estado de operacionalidade dos vários sensores existentes na rede, verificar os consumos de energia dos nós IOT com certas restrições, zelar pela segurança e privacidade dos dados, e monitorizar e gerir serviços gerais da fábrica [7].

A iniciativa estratégica Indústria 4.0 dará origem a novas plataformas CPS, focadas no suporte aos negócios industriais colaborativos e nas redes comerciais associadas, para todo o ciclo de produção de uma fábrica fábricas inteligentes [2]. Presentemente, estão disponíveis várias soluções I-IOT de empresas das áreas energéticas, tecnologia e da automação, que são úteis para implementar redes inteligentes em fábricas. Descrevemos alguns exemplos na seção seguinte.

Soluções para I-IOT

Atualmente, várias empresas oferecem soluções de software e hardware para I-IOT. Nesta seção, são expostas algumas plataformas produzidas por empresas de sistemas de energia ou de tecnologias de automação.

- **CompactRIO (*National Instruments*):** esta plataforma pode processar e analisar dados adquiridos em tempo real, o que permite rapidamente tomar decisões informadas. Os controladores CompactRIO são controladores integrados com módulos de entrada e saída industriais, robustos e com certificação industrial. Integram um conjunto de sensores para visão, movimento, comunicação industrial e interface homem máquina (HMI). O seu controlador combina um processador em tempo real (Intel e ARM), um FPGA (*Field Programmable Array*) programável pelo utilizador (para implementar controlo de alto desempenho com *timers* programáveis) e entradas e saídas industriais, dando aos utilizadores o desempenho e a flexibilidade para atingir os requisitos das suas aplicações [8].
- **Nanobox e Nanopanel SIMATIC IPC227E (Siemens):** os PCs industriais Nanobox são adequadas para medir, controlar, regular e verificar dados de processo ou equipamento industrial, para processamento de imagens ou para visualização descentralizada em combinação com painéis SIMATIC. O PC Nanobox e o Nanopanel SIMATIC IPC227E são um PC e um painel industriais compactos e flexíveis. Fornecem funcionalidades industriais em condições ambientais severas e com um design ultracompacto [9].
- **MindSphere, MindApp e MindConect (Siemens):** o MindSphere é o sistema operacional IOT da Siemens, aberto e baseado na *cloud*, que permite aos utilizadores ligar as suas máquinas e infra-estrutura física ao mundo digital. Permite recolher grandes quantidades de dados proveniente de bilhões de dispositivos inteligentes [10]. Têm uma interface aberta para o

desenvolvimento de aplicações específicas de clientes (MindApps). Além disso, com a MindConnect, a Siemens oferece inúmeras possibilidades para ligar máquinas, chão de fábrica e frotas mundiais à MindSphere, independentemente do fabricante. Existem dispositivos como o MindConnect Nano e MindConnect IoT2040 para transferir dados e permitir conectividade à MindSphere [11].

- **Controlador AC 800M (ABB):** a ABB oferece uma implementação IOT em ambiente industrial com base no sistema de controle 800xA. Os controladores AC 800M são uma família de módulos montados em calha DIN, constituídos por módulos de processamento (CPUs), de comunicação, de alimentação e de vários outros acessórios. Os módulos CPU estão disponíveis numa vasta gama, que varia na capacidade de processamento, memória, classificação e suporte de redundância. Cada módulo CPU está equipado com duas portas Ethernet para comunicação com outros controladores e para interação com os utilizadores, engenheiros ou gestores de rede. Um cartão de memória Flash pode ser inserido num *slot* no módulo CPU para armazenar o programa e os dados gerados. As opções de conectividade e expansão tornam o AC 800M um dispositivo escalável, isto é, é fácil de conectar aos sistemas de supervisão ou dispositivos inteligentes de todos os tipos, e adaptável sempre que ocorram alterações ou expansões dos processos que controla [12].
- **LimeNET (Lime Microsystems):** LimeNET é uma rede de comunicação de elevada capacidade, baseada em rádios definidos por software (SDR), para aplicações móveis e IOT. As estações bases (SRD) são equipadas com processadores Intel i7 e placas de comunicação LimeSDR PCIe [13]. As estações base LimeNET possuem o potencial de transformar a forma como as redes de telecomunicações são operadas, desviando o valor e a ênfase no hardware proprietário, para hardware livre de licença e em conjunto com uma oferta de aplicações (apps) [20].
- **Kuhnke FIO Controller WL (Kendrion Kuhnke Automation):** *Kuhnke FIO Controller WL* é um controlador lógico programável (PLC) com interface Wi-Fi integrada. Oferece escalabilidade e capacidade de expansão modular. Pode ser ligado em qualquer infraestrutura Wi-Fi disponível, mas também pode ser configurado como um ponto de acesso com DHCP. O alcance da rede Wi-Fi pode ser expandido ao conectar o controlador a uma antena externa. Protocolos como FTP Modbus e MQTT estão disponíveis para permitir ligações seguras e a implementação de HMI inovadoras e através de *tablets* ou *smartphones* [15].
- **LioN-Power (Lumberg Automation):** A *Lumberg Automation* disponibiliza módulos de transmissão de energia e transmissão de dados LION-Power para I-IOT. Os módulos de Entrada / Saída LioN-Power Active seguem as especificações do protocolo Ethernet / IP e PROFINET. Os utilizadores obtêm uma solução chave na mão com aplicação na robótica, manipulação de máquinas, fabrico assistido, para as indústrias alimentares e de bebidas, embalagens e de automóvel [16].
- **Gateway IOT (Bosch Rexroth):** o *Bosch Rexroth* criou uma gateway que interliga numa rede IOT máquinas recentes ou já instaladas no chão de fábrica, sem intervir na lógica de automação. Recolhe informação sensorial, processa-a e transfere para sistemas de gestão de informação a correr na *cloud* [17].

CASO DE ESTUDO

A monitorização e análise de vibrações em máquinas rotativas oferece informações muito importantes sobre as anomalias presentes na estrutura interna da máquina. As informações obtidas por análise de vibração permitem planejar uma ação de manutenção preditiva [18].

Neste caso de estudo, os sinais de vibração de um motor elétrico são adquiridos e analisados para implementar mecanismos de manutenção preditiva suportados em IOT. Numa primeira fase, os sinais de vibração são recolhidos por meio do analisador de vibração equipado com um sensor piezoelétrico. Esses sinais são convertidos para o domínio de frequência através de processamento digital de sinal e Transformada de Fourier rápida (FFT). A informação obtida pode ser usada para prever falhas graves, reduzir interrupções forçadas, maximizar a utilização dos equipamentos disponíveis, aumentar a vida das máquinas e reduzir custos de manutenção das máquinas [18]. A manutenção preditiva por análise de vibração é uma excelente ferramenta para esse propósito. A análise de vibração é uma abordagem que usa informação de operação em tempo real dos equipamentos e sistemas do chão de fábrica para otimizar a operação global da fábrica. Um programa abrangente de manutenção preditiva usa as ferramentas mais económicas (por exemplo, monitorização de vibrações, termografia, tribologia) para obter a condição de operação real dos sistemas críticos do chão de fábrica e com base nesses dados reais, agenda todas as atividades de manutenção de acordo com as necessidades. Incluir manutenção preditiva num programa abrangente de gestão de manutenção otimiza a disponibilidade das máquinas e reduz os custos de manutenção. Também melhora a qualidade do produto, os níveis de produtividade e a rentabilidade das fábricas e instalações de produção [19].

O transdutor que, hoje em dia, é usado universalmente para medidas de vibração é o acelerómetro piezoelétrico. Possui melhores características do que qualquer outro tipo de transdutor de vibração. Possui uma gama de frequência e gama dinâmica elevadas, com boa linearidade ao longo dos intervalos. É relativamente robusto e confiável para que suas características permaneçam estáveis durante um longo período [20]. Os acelerómetros são tipicamente colocados em posições-chave nos rolamentos do motor e do ventilador. Os sensores de vibração devem ser colocados nas posições radial (vertical e horizontal) e axial no motor e nos rolamentos do ventilador. Esse procedimento proporciona a melhor deteção de todos os componentes de vibração, incluindo: vibração de rolamento, desequilíbrio, desalinhamento, falhas elétricas, distúrbios aerodinâmicos e vibrações da correia [21].

Um bom sistema para monitorização de vibrações, seja ele portátil ou permanente, e com ligação à rede de comunicação da Fábrica, será certamente a base de qualquer iniciativa de manutenção preditiva em motores elétricos. Além disso, é muito importante selecionar um sensor apropriado para medir vibrações. Os três parâmetros que representam o movimento detetado pelos sensores de vibração são o deslocamento, a velocidade e a aceleração. Esses parâmetros podem ser medidos por uma variedade de sensores de movimento e estão matematicamente relacionados. A seleção de um sensor proporcional ao deslocamento, velocidade ou aceleração depende das frequências de interesse e dos níveis de sinal (tensão ou corrente elétrica) envolvidos [22].

Neste estudo de caso, os dados de vibração são detetados pelo acelerómetro piezoelétrico colocado na estrutura de um motor. Demonstramos o funcionamento de duas arquiteturas diferentes para obter os dados de vibração. A primeira, usando o

hardware NI DAQ e a segunda, usando Arduino e um modulo para comunicação segundo o protocolo EtherCAT. O software LabVIEW e um servidor OPC são usados para visualizar e armazenar dados, respectivamente.

Aquisição de dados de vibração

Na Figura 1, apresentam-se os diagramas das duas arquiteturas implementadas.

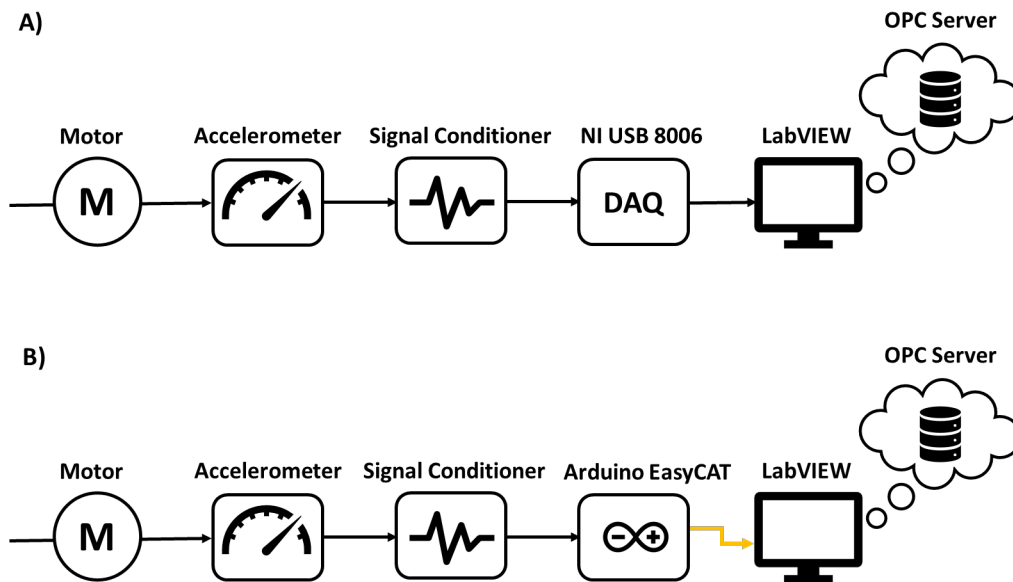


Figura 1. Diagrama de blocos para aquisição de dados com: A) NI-DAQ B) EtherCAT

Ambas as arquiteturas são formadas por um motor elétrico, um acelerômetro, um condicionador de sinal, uma aplicação LabVIEW e um servidor OPC. A principal diferença entre eles é o dispositivo usado para processar dados de vibração. Na arquitetura A, a placa de aquisição de dados é uma NI DAQ 6008 e, na arquitetura B, é uma placa Arduino UNO com o módulo EasyCAT para comunicação de dados com o protocolo EtherCAT.

O equipamento específico que é usado nessas arquiteturas é:

- **Motor elétrico:** um motor da marca *Industrie Elektronik* (tipo LGHA 63) cujas características são: potência $P = 0,2$ kW; velocidade de rotação do motor $n_1 = 3000$; tensões $U_a / U_f = 160 / 200$ V; correntes $I_a / I_f = 1,6 / 0,22$ A; $F_f = 1,0$; $I_p = 44$.
- **Acelerômetro piezoelétrico:** é o acelerômetro de um eixo da marca DYTRAN, modelo 3134D que opera com uma sensibilidade de 500 mV/g.
- **Condicionador de sinal:** é o modelo 482A21. Esta unidade fornece excitação de corrente constante ao amplificador transdutor incorporado e desacopla o sinal da tensão de polarização DC.
- **NI LabVIEW:** Plataforma para computador 32 bits da *National Instruments* para desenvolver sistemas de medição e controle.
- **Servidor OPC:** as especificações OPC (*Object Linking and Embedding for Process Control*), são um conjunto de normas de interface aberta para a comunicação entre aplicações de automação e controle, sistemas e dispositivos da linha de produção e do chão de fábrica, e aplicações de escritório presentes em processos de controle industriais. As normas são estabelecidas pela fundação OPC (uma corporação sem fins lucrativos)

patrocinada pela *Intellution*, Microsoft entre outras). Com base na tecnologia OLE / COM / DCOM da Microsoft e caracterizada por uma arquitetura cliente / servidor, o OPC é independente da linguagem de programação e suporta a integração e interoperabilidade entre aplicações em ambientes industriais heterogêneos ou distribuídos. Na questão da transferência de dados, o servidor OPC atua como um "SmartBox de Software", lendo dados de vários tipos de dispositivos e uniformizando esses dados segundo a norma OPC para a integração de diferentes sistemas e dispositivos [23]. Concretamente, neste caso de estudo, é usado o servidor MatrikonOPC. Este servidor fornece soluções de conectividade entre dispositivos, com base na norma OPC. O Servidor OPC comunica com um ou mais clientes OPC para escrever ou ler dados.

- **NI DAQ 6008:** é um dispositivo DAQ com porta USB da *National Instruments*. Atua como uma interface entre o computador e o mundo exterior. A sua função é digitalizar sinais analógicos recebidos para que o computador possa interpretá-los. Para usar a aquisição do bloco DAQ no LabVIEW, é necessário instalar o driver NI-DAQmx [24].

Dispositivo	NI-DAQ	Shield EasyCAT Arduino
Tecnologia de Comunicação	USB 2.0	EtherCAT
Distância máxima entre a smartBox e o PC	5 metros	100 metros
Configuração Labview	Configuração simples com o bloco DAQ Assist	Configuração complexa com blocos de aquisição EtherCAT
Requisitos de software	NI-DAQmx driver	Biblioteca 'EasyMaster' para LabVIEW 32 bits Biblioteca 'EasyCAT.h' para ficheiro de configuração Arduino 'EasyCAT.xml' (ESI)
Ritmo de transmissão	480 Mbit/s	2 x 100 Mbit/s (Fast Ethernet, Full-Duplex)
Custo	288 €	61 €
Custos adicionais	—	Placa Arduino

Tabela 1. Diferenças entre as soluções NI-DAQ e Ethercat - Arduino

- **Arduino UNO + módulo EasyCAT:** O módulo EasyCAT Arduino da *AB & T Technologie Informatice* é necessário para realizar a comunicação sobre o protocolo EtherCAT [25]. EtherCAT é um protocolo de comunicação industrial que funciona em tempo real e é amplamente considerado como a melhor rede

industrial até à data. É uma ordem de grandeza mais rápido do que muitas soluções bem conhecidas, como Profibus, DeviceNet e ModbusTCP. Os fornecedores de equipamentos de automação podem utilizar o EtherCAT nas suas linhas de produção para melhorar o desempenho e a flexibilidade. Os utilizadores finais e os responsáveis dos sistemas de automação também podem implementar os seus próprios dispositivos compatíveis com EtherCAT para necessidades específicas [26].

A Tabela 1 indica diferenças entre NI-DAQ e Arduino com módulo EasyCAT. A principal vantagem de usar NI-DAQ é a sua taxa de transmissão e a facilidade de configuração em LabVIEW. Em contrapartida, a principal vantagem de usar o módulo EtherCAT em conjunto com a placa Arduino é seu custo e a distância efetiva entre as estações de Entrada e saída de dados.

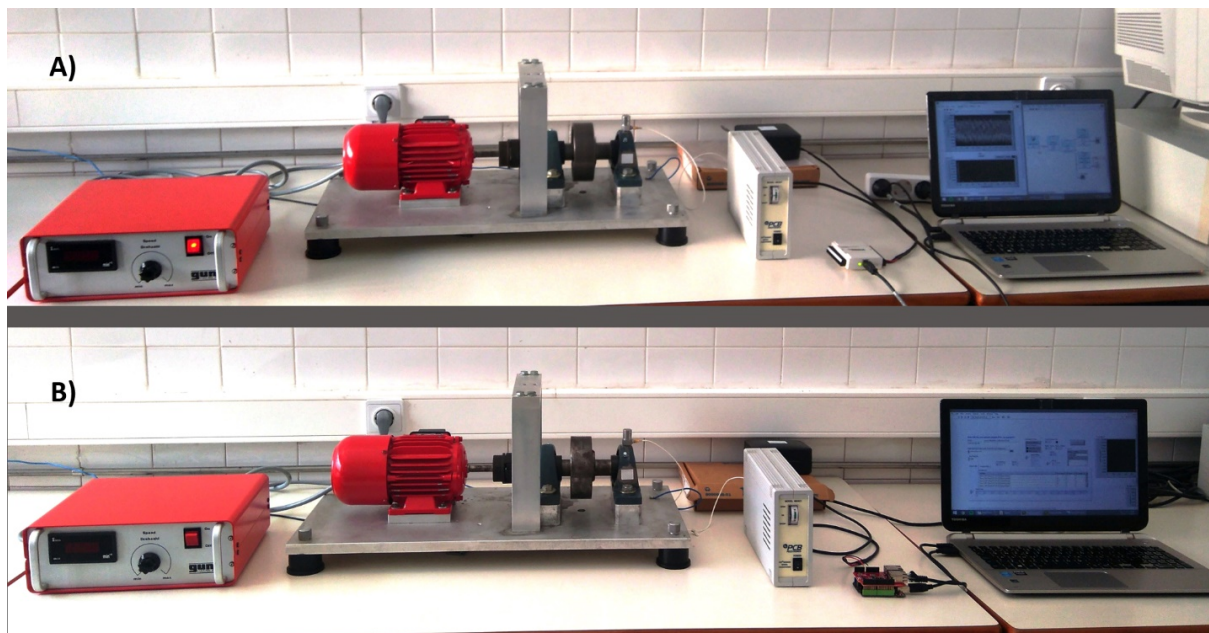


Figura 2. Bancada de testes para aquisição de dados de vibração com: A) NI-DAQ e B) EtherCAT com Arduino.

Esses dispositivos estão ligados para formar as redes que são mostradas na Figura 2. Da esquerda para a direita estão: um conversor de frequência para regular o motor, um motor elétrico, o acelerômetro piezoelétrico que está ligado a esta estrutura do motor e ligado à porta de entrada do condicionador de sinal. O sinal de saída do condicionador de sinal é um sinal analógico e diferencial que passa por uma entrada analógica do dispositivo NI DAQ (arquitetura A) ou através de uma entrada analógica do Shield EasyCAT Arduino (arquitetura B). O dispositivo de aquisição de dados está conectado a um PC via USB (arquitetura A) ou via EtherCAT (arquitetura B).

Uma vez a ligação efetuada, é necessário correr uma aplicação LabVIEW para adquirir dados. Em ambos os casos, deve-se configurar o sinal de aquisição como uma entrada analógica (tensão). Na arquitetura A, o dispositivo NI DAQ fornece um sinal de tensão que requer uma conversão para aceleração (o acelerômetro tem uma sensibilidade de 500 mV / g) usando a conversão de equação (1):

$$V_{entrada} \cdot \frac{1 g}{0,5 V} \cdot \frac{9,8 m/s^2}{1 g} = Aceleração (m/s^2) \quad (1)$$

Na arquitetura B, o sinal fornecido é digital com 255 níveis, assim a conversão para aceleração é calculada segundo a equação (2):

$$X \text{ unidades} \cdot \frac{5 V}{255 \text{ unidades}} \cdot \frac{1g}{0,5 V} \cdot \frac{9,8 m/s^2}{1 g} = \text{Aceleração (m/s}^2\text{)} \quad (2)$$

Posteriormente, o valor de aceleração é matematicamente integrado para fornecer um sinal de velocidade proporcional e é filtrado por um filtro passa-banda com uma largura de banda de 10 Hz a 1000 Hz. A medição do deslocamento dará maior peso às componentes de baixa frequência e, inversamente, as medidas de aceleração irão evidenciar-se nas componentes de alta frequência. A experiência mostrou que o valor geral de médio da velocidade de vibração medido no intervalo de 10 a 1000 Hz dá a melhor indicação do nível de gravidade da vibração do motor. Uma explicação provável é que um determinado nível de velocidade corresponde a um determinado nível de energia, de modo que a vibração em frequências baixas e altas seja igualmente ponderada de um ponto de vista de energia de vibração. Na prática, muitas máquinas têm um espectro de velocidade relativamente uniformes [20].

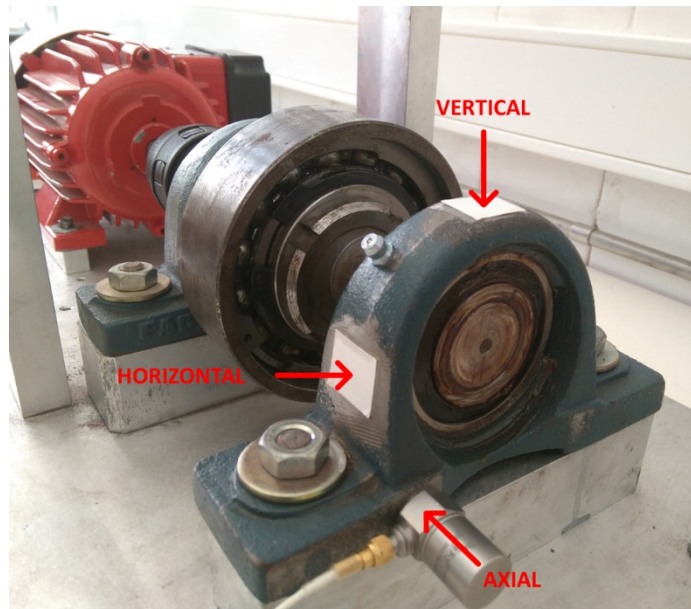


Figura 3. Eixos de medida sobre a estrutura acoplada ao motor.

A velocidade de vibração de um motor é normalmente medida em três direções: horizontal, vertical e axial, conforme indicado na Figura 3. Tirando medidas nessas três direções fornece mais informações que ajudam na análise do problema, pois alguns defeitos provocam vibrações predominantes numa direção. Axial é a direção paralela à linha central do eixo ou eixo de rotação de uma peça rotativa. Vertical é a direção em direção ao centro de rotação do eixo ou rotor. Horizontal é a direção perpendicular ao centro de rotação [27].

Uma vez os dados adquiridos, a informação é convertida para ser analisada. Existem vários métodos de análise, entre os quais:

- Análise de vibração no domínio do tempo: a análise do domínio do tempo é diretamente baseada na forma de onda do sinal ao longo do tempo. Da análise temporal de um sinal, obtêm-se normalmente dados estatísticos comuns, como

a média, a amplitude, o valor de pico, o valor de pico a pico e a média quadrática (RMS) [28].

- Análise de vibração no domínio da frequência: esta análise é baseada no sinal depois de transformado para o domínio de frequência. A vantagem da análise de domínio da frequência em comparação com a análise no domínio do tempo, é sua capacidade em identificar e isolar determinadas componentes de frequência de interesse. A análise convencional mais utilizada é a análise do espectro por meio da FFT. O objetivo principal da análise espectral é abarcar as características do sinal em todo o espectro, ou observar atentamente apenas certas componentes de frequência de interesse e assim extrair especificidades do sinal [28]. O resultado pode ser a amplitude de vibração em função da frequência, o que nos permite realizar análises no domínio da frequência (ou espectro) para uma compreensão mais profunda do perfil de vibração do motor. A maioria das análises de vibração é normalmente realizada no domínio da frequência [29].

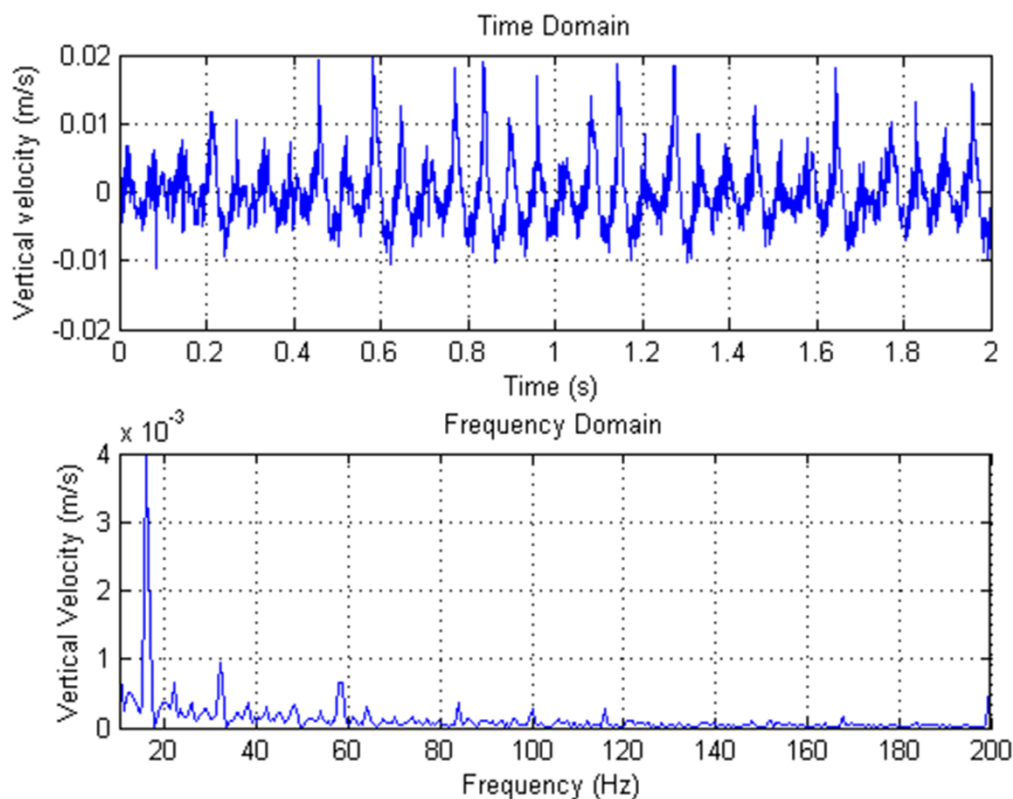


Figura 4. Medidas de velocidade de vibração no eixo vertical, nos domínios do tempo e da frequência.

A velocidade de vibração no eixo vertical é mostrada na Figura 4. O gráfico inferior mostra a forma de onda no domínio a frequência, onde a frequência fundamental (1x) é aproximadamente de 15 Hz, para além de componentes harmônicas em frequências 2x, 3x, 4x, etc., da frequência fundamental, para as quais a amplitude vai diminuindo. Como a amplitude da componente fundamental (1x) da medida vertical é alta e os harmônicos são menores que 15 % da componente fundamental, pode haver desequilíbrio [30]. Além disso, o segundo harmónico (2x) indica que pode haver desalinhamento.

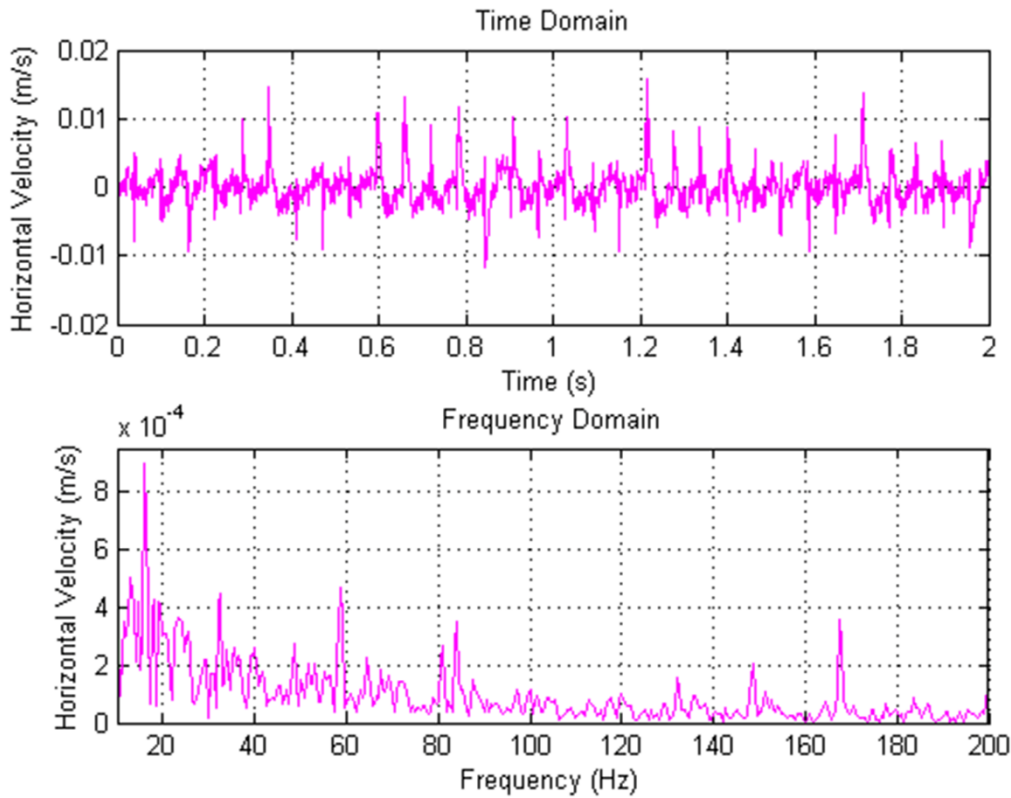


Figura 5. Medidas de velocidade de vibração no eixo horizontal, nos domínios do tempo e da frequência.

A velocidade de vibração no eixo horizontal vem representada na Figura 5. O gráfico inferior mostra a forma de onda no domínio a frequência. Existe uma série de três ou mais múltiplos síncronos ou 1/2 múltiplos síncronos da velocidade de rotação (entre 2x a 10x a frequência fundamental), e suas amplitudes são superiores a 20 % da componente fundamental (1x), o que pode indicar uma folga mecânica. Com desalinhamento severo, o espectro pode conter harmônicos múltiplos de 2x a 10x da frequência fundamental da velocidade de funcionamento [30].

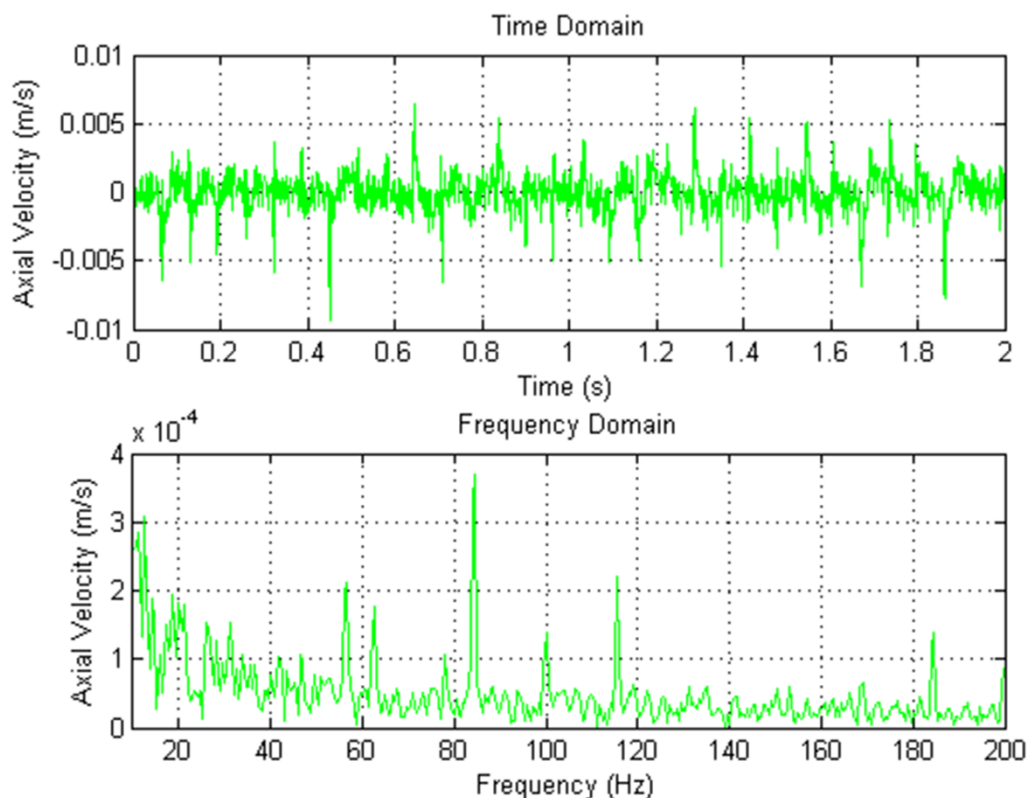


Figura 6. Medidas de velocidade de vibração no eixo axial, nos domínios do tempo e da frequência.

A velocidade de vibração no eixo axial é mostrada na Figura 6. O gráfico superior mostra a variação do sinal medido no domínio do tempo, que varia entre -0,005 e 0,005 m / s. O gráfico inferior mostra a forma de onda depois de calculada a FFT. Este espectro indica que existe um defeito no rolamento interno do eixo do motor [30].

CONCLUSÃO

A Indústria 4.0 vem acompanhada com novas tecnologias a paradigmas, como a Internet das Coisas, Sistemas Ciberfísicos, Computação em Nuvem e redes inteligentes, com base em dispositivos sem fios, equipados com sensores, e que trocam informações de forma autónoma, desencadeando ações e com controlo independentemente e autónomo. Os SmartBoxes inteligentes simplificam consideravelmente o processo para exportar dados e funcionalidades dos dispositivos físicos para os utilizados, através na web.

No caso de estudo anterior, foram testados dois SmartBoxes para obter e analisar os dados de vibração de um motor elétrico. A Tabela 1 mostra uma comparação entre os protocolos (EtherCAT e USB) usados em ambos os SmartBoxes. Os resultados são semelhantes no que diz respeito a identificar a gravidade da vibração - neste caso, é insatisfatório - e permitem implementar uma manutenção preditiva.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Smit, J., Kreutzer, S., Moeller, C., & Carlberg, M. (2016). *Industry 4.0 by Policy Department A*. Consultado a 22 de maio de 2017, em <http://www.europarl.europa.eu/studies>

- [2] Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). Recommendations for Implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 working group. Forschungsunion.
- [3] Co-FACTOR project. (n.d.). Consultado em 19 de maio 2017, em <http://www.cofactor-eu-project.org/>
- [4] Li, Q., Qin, W., Han, B., Wang, R., & Sun, L. (2011). A case study on REST-style architecture for cyber-physical systems: Restful smart gateway. *Computer Science and Information Systems*, 8(4), 1317-1329.
- [5] Geisberger, E., Cengarle, M., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C., & Thönnißen-Fries, H. J. (2011). Cyber-Physical Systems-Driving force for innovation in mobility, health, energy and production, acatech-Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- [6] Ray, L. (2017). Cyber-Physical Systems. *Handbook of Research on Applied Cybernetics and Systems Science*, 335.
- [7] Aazam, M., Hung, P. P., & Huh, E. N. (2014, Abril). Smart gateway based communication for cloud of things. In *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2014 IEEE Ninth International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Meet the CompactRIO Controller. (24 de março 2016). Consultado a 18 de maio 2017, em <http://www.ni.com/white-paper/52251/en/>
- [9] SIMATIC Box PC. (n.d.). Consultado a 18 de maio de 2017, em <http://w3.siemens.com/mcms/pc-based-automation/en/industrial-pc/box-pc/Pages/Default.aspx>
- [10] The Internet of Things is speaking. (n.d.). Consultado a 19 de maio 2017, em <https://www.siemens.com/global/en/home/products/software/mindsphere.html>
- [11] MindSphere. (n.d.). Consultado a 12 de junho 2017, em <https://www.plm.automation.siemens.com/store/en-ie/mindsphere/index.html>
- [12] AC 800M controllers. (n.d.). Consultado a 19 de maio 2017, em <http://new.abb.com/control-systems/system-800xa/800xa-dcs/hardware-controllers-io/ac800m-controllers>.
- [13] LimeNET Network-in-a-Box. (n.d.). Consultado a 18 de maio 2017, em <https://www.crowdsupply.com/lime-micro/limenet>
- [14] C. (2017, February 16). Lime Microsystems and Canonical announce LimeNET crowdfunding. Consultado a 20 de junho 2017, em <https://insights.ubuntu.com/2017/02/16/lime-microsystems-and-canonical-announce-limenet-crowdfunding/>
- [15] Malente (20 Outubro 2016). *Kuhnke FIO Controller WL - IoT compatible Controller*. Consultado a 19 de maio 2017, em

<http://kuhnke.kendrion.com/industrial/ics/en/press-releases/iot-compatible-controller-plc-with-integrated-wifi-data-interface.html>

- [16] Lion-Power Active I/O modules. (n.d.). Consultado a 18 de maio 2017, em http://www.lumberg-automation.com/en/Lumberg_Automation/news/lion-power/index.phtml
- [17] Industry 4.0 for new and existing machines. (Novembro 21 2016). Consultado a 20 de junho 2017, em <https://www.boschrexroth.com/en/xc/company/press/index2-25280>
- [18] Orhan, S., Aktürk, N., & Celik, V. (2006). Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. *Ndt & E International*, 39(4), 293-298.
- [19] Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann.
- [20] Brüel&Kjær, S. (1982). *Measuring Vibration*. Consultado a 1 junho 1 2017, em <https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>
- [21] Connection Technology Center. (n.d.) *Measuring Fan and Motor Vibration*. Consultado a 22 de maio 2017, em <https://www.ctconline.com/pdf/pubTechPapers/23-Measuring%20Fan%20and%20Motor%20Vibration.pdf>
- [22] SKF Condition Monitoring. (1999). *Vibration Sensors*. Consultado a 22 de maio de 2017, de http://www.exvalos.cz/soubory/File/SKF/SNIMACE_VIBRACI.pdf
- [23] Ling, Z., Chen, W., & Yu, J. (2004, junho). Research and implementation of OPC server based on data access specification. In Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on (Vol. 2, pp. 1475-1478). IEEE.
- [24] NI-DAQmx Software. (n.d.). Consultado a 14 de junho 2017, em <https://www.ni.com/dataacquisition/nidaqmx.htm>
- [25] Bausano (n.d.). Arduino EasyCAT. Consultado a 14 junho 2017, em <http://www.bausano.net/en/hardware/ethercat-e-arduino/easycat.html>
- [26] What's EtherCAT? (n.d.). Consultado a 13 de junho de 2017, em <https://www.automation.com/automation-news/article/whats-ethercat>
- [27] Soliman, M. H. A. (2015, March 12). *Machine Vibration Analysis*. Consultado a 8 de junho de 2017, em <https://es.slideshare.net/MohammedHamedAhmedSo/machine-vibration-analysis>
- [28] Wang, R., & Chen, N. (dezembro 2016). A survey of condition-based maintenance modeling of multi-component systems. Em *Industrial*

Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on (pp. 1664-1668). IEEE.

- [29] Hanly, S. (junho 2016) *Vibration Analysis: FFT, PSD, and Spectrogram Basics*. Consultado a 6 de junho 2017, em <https://blog.mide.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram>
- [30] Mais, J. (maio 2002). *Spectrum Analysis. The key features of analysing spectra*. Consultado a 8 de junho 2017, em <http://www.skf.com/binary/tcm:12-113997/CM5118%20EN%20Spectrum%20Analysis.pdf>