



Interreg
España - Portugal



MANUFACTUR4.0

Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvemento Regional



Estado da Arte e do Conhecimento adquirido pelos parceiros nas tecnologias envolvidas no projeto Manufactur4.0

PRIMEIRO RELATÓRIO DE VIGILÂNCIA TECNOLÓGICA

31/12/2018



Índice

1	Introdução	3
2	Aposta na Inovação	5
2.1	INESC-TEC	5
2.2	AIMEN.....	7
2.3	GAIN (CIS GALICIA)	8
3	Tecnologías facilitadoras 4.0.....	9
3.1	Logística Interna baseada em AGVs	10
3.2	Interface Homem Máquina Avançados	10
3.2.1	Impacto na Industria Metalomecânica.....	11
3.3	Digitalização da Fábrica	11
3.4	Programação Off-line de Robôs Industriais	12
3.5	Visão Artificial na Industria	13
3.5.1	Reconhecimento e Localização.....	14
3.5.2	Scan de soldaduras – caso na industria naval e metalomecânica.....	15
3.5.3	Software para o processamento de dados 2D e 3D.....	15
3.6	Controlo de processo de maquinação e soldadura	16
3.7	Controlo de qualidade e inspeção de processo	17
3.7.1	Inspeção 2D e 3D de cordões de soldadura recorrendo a visão Artificial.	17
3.7.2	Monitorização de defeitos na soldadura a laser utilizando sensores de imagem.....	18
3.7.3	Controlo dimensional e superficial de peças mecanizadas	19
4	Soluções comerciais e patentes relacionadas.....	20
4.1	Automação de processos especializados de soldadura e maquinação no setor naval e metalomecânico. 20	
4.2	Interface Homem Máquina.....	24
4.3	Logística Interna baseada em AGVs	26
5	Conclusão.....	27
	Referências.....	27

1 Introducción

Desde 2015 el sector metalúrgico e metalomecánico en Portugal e Galiza tem vindo a recuperar a sua importância no PIB da euro-región. As exportaciones no último ano foram as mejores de sempre, as empresas están mais sólidas do punto de vista financeiro, o investimento aumentou significativamente e o emprego creceu en cantidad e calidad¹.

Para a AIMMAP (Asociación Dos Industriais Metalúrgicos, Metalomecánicos e Afins de Portugal), este comprobado crecimiento da indústria metalúrgica e metalomecánica deve-se à aposta das empresas em 3 pilares distintos. São eles:

- A formación e cualificación de trabajadores, asegurada pelos centros especializados nas áreas afins a esta indústria;
- A aposta na innovación de produtos e procesos, suportada por una estrategia de diferenciación e de subida na cadeia de valor, asociada a elevados padrões de qualidade e customización,
- A internacionalización, na procura da diversificación de mercados, em consonância com a estratégia de diferenciación, na procura de nichos regionais ou setoriais, e da integración em cadeias de valor globais².

Em qualquer dos casos é muito importante a alteração de paradigma verificada na última década, com a mudança duma realidade em que os projetos de inovação estavam confinados à própria empresa para um modelo de inovação aberta em que passa a ser importante a participação em projetos de natureza colaborativa, com especial realce para a cooperação entre empresas e as entidades do SCT, conforme se constata nos programas de incentivo nacionais, tais como o P2020 no caso Português e, mais recentemente, com a participação crescente em projetos europeus.

O sector metalúrgico e metalomecánico acumula características muito particulares, uma vez que grande parte das atividades que o compõem produzem bens de suporte à produção dos demais sectores - bens intermédios e bens de capital - e/ou bens duradouros para consumo final.

Pela sua natureza, sector metalúrgico e metalomecánico ocupa uma posição central no crescimento económico das economias modernas, dado o seu papel no desenvolvimento e difusão de novas tecnologias³.

¹<http://aimmap.blogspot.pt/>

²“Still throughout this (2008-2009) period GVC trade (simple and complex combined) accounted for 60-67% of global trade in value added terms”, pag 2, Measuring and Analysing the Impact of GVCs on Economic Development, IBRD & World Bank, 2017, <http://documents.worldbank.org/curated/en/440081499424129960/pdf/117290-WP-P157880-PUBLIC.pdf>

A estratégia das empresas deste sector industrial exige na sua maioria o desenvolvimento de processos voltados para a fabricação de componentes em pequenas séries e/ou até mesmo customizadas. A produção de pequenos lotes, as contínuas mudanças de referência do produto e a realização de mudanças frequentes nas linhas de produção, exigem um importante esforço na flexibilização dos processos associada a uma exigência de quase-zero defeitos e uma necessidade de evolução no design das células de fabrico industriais. Neste sentido, a tendência passa por desenvolver soluções flexíveis com alto valor tecnológico que combinem alta produtividade e rentabilidade, por forma a responderem aos novos desafios com que esta industria se depara. Neste documento, realizamos uma pequena introdução ao estado da arte e ao conhecimento adquirido pelos parceiros do projeto nas áreas tecnológicas dos demonstradores que serão desenvolvidos, e divulgados, no projeto MANUFACTUR4.0.

Na próxima secção serão apresentados alguns projetos de maior impacto, nos quais os parceiros ligados diretamente ao desenvolvimento dos demonstradores do projeto MANUFACTUR4.0 estiveram envolvidos, uma vez que são estes que aportam maior experiência nas tecnologias 4.0 candidatas a serem integradas.

³Sector Metalúrgico e Metalomecânico | Diagnóstico Competitivo e Análise Estratégica - Relatório Final – Augusto Mateus& Associados. 2010

2 Aposta na Inovação

2.1 INESC-TEC

No contexto da industrial 4.0, o INESC-TEC tem tido cada vez mais um papel ativo no setor da metalomecânica, através do desenvolvimento de novas tecnologias transformadoras enquadrados em projetos P2020, FP7, H2020 ou de diretas subcontratações. Esta participação tem-se focado maioritariamente em quatro tecnologias: o desenvolvimento de sistemas robotizados para a logística interna flexível; o desenvolvimento de células robotizadas com grau de flexibilidade e custo enquadrados na realidade das PME's nacionais; no desenvolvimento de sistemas avançados de Interface Homem Máquina; e no desenvolvimento de mecanismos de integração e standardização da informação entre os sistemas robóticos e a plataforma de IIoT. Alguns exemplos de projetos onde o INESC-TEC desenvolve/desenvolveu atividades dentro destas tecnologias são:

- **CARLOS - “CooperActive Robot for LargeSpacesmanufacturing”**, Research for SME Grant agreement nº: 606363, Callidentifier: FP7-SME-2013-1, cujo objetivo principal focou-se no desenvolvimento de uma plataforma móvel e autónoma adequada para a execução de operações no interior de cabines e blocos de navios (espaços não estruturados). Nesse sentido procurou-se a realização de operações de habilitação naval completamente automatizadas, como a soldadura de *stud* e operações de assistência ao operador. Ao mesmo tempo, o sistema robótico consegue interagir com os operadores humano para receber e solicitar informações (área de trabalho, resolução de ambiguidades, projeção de informação, etc). Neste projeto esteve também envolvido um dos parceiros do projeto MANUFACTUR4.0 - o Centro Tecnológico AIMEN.
- **STAMINA –“SustainableandReliableRobotics for Part Handling in ManufacturingAutomation”**, EuropeanUnion’sSeventh Framework Programme for research, technologicaldevelopmentanddemonstrationundergrantagreement N° 610917, cujo objetivo principal focou-se no desenvolvimento de uma frota de robôs industriais autónomos e móveis com diferentes capacidades sensoriais para a resolução de três tarefas principais de logística, montagem e manipulação: des-paletização, *Bin-picking* e *Kitting*. No desenvolvimento do projeto foi utilizada uma abordagem holística, com uma série de testes de desenvolvimento e validação, para avaliar o desempenho e validação dos sistemas e permitindo o desenvolvimento de investigação orientada aos objetivos. O projeto STAMINA dá especial atenção à integração de sistemas, e promove e avalia o desenvolvimento de sistemas robóticos sustentáveis e escaláveis para assegurar um caminho claro para a futura exploração das tecnologias desenvolvidas.
- **ATM – “AdvancedTools Management, InternalLogistics for metalworkingindustryusingLeanAGVs”**, cujo objetivo principal é desenvolver uma solução avançada e competitiva de planeamento de operações, com otimização em termos de utilização de equipamentos e ferramentas, integrada com o sistema logístico baseado em AGV’sLean. Os destinatários são essencialmente pequenas e médias empresas que

operam no campo da metalomecânica de precisão, onde o problema de gestão de ferramentas geralmente ocorre. O uso desta solução aumentará a disponibilidade de ferramentas e a conseqüentemente permitirá melhorar a eficiência do trabalho, reduzindo o custo da gestão logística e disponibilizando os operadores para outras atividades de maior valor acrescentado.

- **CLARiSSA – “CooperativeDual-Arm Robot for StructuralSteelfAbrication”,** FP7 SMErobotics, EuropeanUnion’sSeventh Framework Programme nº 287787, cujo objetivo principal é o desenvolvimento de um robô cooperativo de dois braços para a realização de tarefas de soldadura de pequenos componentes em vigas no contexto das PMEs.
- **CoopWeld – “Robótica colaborativa para soldadura de componentes em construção metálica”,** financiado pelo NORTE-01-0247-FEDER-006438 (P2020), cujo o objetivo é demonstrar, num ambiente industrial relevante, uma solução robótica aplicada à soldadura de estruturas metálicas para a indústria da construção. Esta célula resulta de uma análise detalhada das necessidades das PME e, portanto, trata-se de um equipamento fácil de operar e manter.

Para atingir os objetivos acima descritos, o projeto propõe o desenvolvimento de um robô colaborativo com as seguintes características: completa integração de informações de desenho CAD para automação do processo de soldadura; Sensorização e percepção avançada; Impacto reduzido no layout da fábrica através da integração avançada de sensores que habilitam a partilha de espaço entre operador e robô industrial.

- **Riduba – “FÁBRICA DIGITAL”,** cujo objetivo é introduzir inovação na organização dos métodos de trabalho da empresa, processos produtivos e serviços disponibilizados aos seus clientes. Para isso propõe-se realizar as seguintes ações: reformulação dos seus processos de negócio nucleares; Adoção de ferramentas informáticas avançadas de gestão empresarial; Adoção de tecnologias de produção robotizada, totalmente integradas com as ferramentas de engenharia e planeamento de operações; criação de um novo serviço de suporte à instalação em obra dos equipamentos da rede de incêndios pré-fabricados.

Todos estes projetos surgem da necessidade dos industriais deste sector de atividade decrescerem e se tornarem competitivos no mercado mundial. Neste sentido, é importante trabalhar na geração de conhecimento científico em tecnologias, com aplicação transversal ao nível do setor, que potenciem a inovação e a criação de tecnologias facilitadoras incorporando desenvolvimentos disruptivos, e ao mesmo tempo promover a sua transferibilidade para o chão de fábrica das empresas.

Este conhecimento justifica papel do INESC-TEC como responsável pelos demonstradores de realidade aumentada para operações de montagem de componentes e pela integração de sistemas avançados de produção no setor metalomecânico.

2.2 AIMEN

Na indústria naval e metalomecânica, os processos de transformação que exigem uma maior carga de trabalho manual e, portanto, de baixos rácios produtivos e com maiores problemas de controlo de qualidade (uma vez que se baseiam na experiência do operador), são o processo de soldadura e o de maquinação. Na sua maioria, grande parte das operações envolvidas nestes processos, tanto nos estaleiros navais como na indústria auxiliar e no campo da caldeiraria pesada, são realizadas com equipamentos convencionais. Por esta razão, é necessário automatizar estes processos manuais, sendo que há cada vez mais empresas neste setor a adotar novas tecnologias adaptativas e reconfiguráveis para melhorar seus processos de fabricação, por forma a tornarem-se mais competitivas no mercado.

O Centro Tecnológico AIMEN tem vários projetos em linha com a política de investigação Europeia, no H2020, em novas tecnologias avançadas de fabricação (*SmartManufacturing*) no setor metalúrgico, considerado no programa europeu como uma área de inovação transversal e como ferramenta indispensável para a cumprimento de objetivos de "zero defeitos". Acima de tudo, no desenvolvimento de sistemas robotizados flexíveis adaptados a lotes de fabricação curtos (*LEAN AUTOMATION*) e desenvolvimento de novas ferramentas de programação com alto nível de abstração para o utilizador:

- **CARLOS - "CooperAtive Robot for Large Spaces manufacturing"**, Research for SME Grant agreement n°: 606363, Call identifier: FP7-SME-2013-1 apresentado anteriormente.
- **SONIA - "Desarrollo de un sistema robotizado flexible y adaptativo orientado a la automatización de procesos productivos de series cortas o únicas"**, Proyectos de cooperación tecnológica entre PYMES – Fondo Tecnológico 2011 (IDI – 20111654). Este protótipo consiste numa célula flexível de maquinação de bocais, na qual a programação manual de trajetórias é eliminada, passando a ser realizada de forma automática (programação off-line) a partir dos formatos de ficheiros CAD/CAE/CAM sendo a geometria do componente identificada por meio de visão artificial 2D e 3D e perfilometria laser.
- **ROBOFLEX – "Desarrollo de una celda robotizada flexible y multiproceso aplicada al sector metalmeccánico"**, CONECTAPEME 2014 (IN852A 2014/48). Esta célula é capaz de realizar de forma automática diferentes processos ou aplicações, como corte e soldadura, trabalhando de forma sequencial entre ambas as operações. Conta ainda com um sistema de visão artificial para aumentar a precisão da localização e um sistema de programação offline baseada em modelos CAD para a geração automática de trajetórias.
- **SHIPBUILDING 4.0 – "Desarrollo de un proyecto dinamizador de la capacidad innovadora del sector naval gallego"**, 2015. Um dos demonstradores do projeto consiste numa célula de soldadura robotizada por arco de micro painéis navais. Este sistema é baseado num pórtico cartesiano de três eixos XYZ sobre qual

se monta no extremo do eixo Z, um robô industrial antropomórfico de 6 eixos por forma a que ambos se possam mover de forma simultânea e coordenada aquando da sua operação. Esta configuração aumenta a área de trabalho do robô e está pensada para peças de grandes dimensões (como as que são processadas no setor naval) ou para o processamento de áreas de difícil acessibilidade. A geração de automática de trajetórias é realizada off-line a partir dos modelos CAD e os painéis são localizada baseados em visão artificial.

2.3 GAIN (CIS GALICIA)

No ambiente industrial, a tendência geral é o aumento da produtividade associado ao grau tecnológico do sistema produtivo, primeiro associado à automação de processos, seguido pelo nível de controlo baseado em equipamento digital e, em seguida, pela introdução e uso das TIC. A digitalização das empresas industriais permite, além do aumento da produtividade, aumentar a flexibilidade das instalações, passando da produção em série para a produção à medida de cada cliente, melhorando assim a competitividade. A digitalização é a base da Indústria 4.0, que leva à conectividade, mas não menos importante é a virtualização, na forma de simulação de processos, modelos digitais, uso da realidade virtual e realidade aumentada.

Para melhorar a sua integração na indústria 4.0, as empresas industriais galegas e portuguesas necessitam de melhorar o seu nível de digitalização. Cerca de 35% das indústrias do setor naval-metalomecânico espanhol já iniciaram o processo de digitalização e espera-se que, em 2020, essa percentagem alcance os 60%.

A participação da GAIN neste projeto e em outros, como a Shipbuilding 4.0, visa apoiar o processo de introdução de tecnologias 4.0 no setor naval e metalomecânico.

Dentro da GAIN, a CIS GALICIA trabalha com o objetivo de introduzir tecnologias inovadoras na indústria galega. Possui elevada experiência em projetos de Digitalização 3D, Robótica Colaborativa, Realidade Virtual e Aumentada, Visão Artificial, Fábrica Virtual, etc. Este conhecimento justifica seu papel como responsável pelos demonstradores da realidade aumentada, controlo dimensional sem contato e a virtualização de uma indústria naval - metalurgia que irá incorporar os demonstradores previamente desenvolvidos.

A experiência da CIS GALICIA pode ser resumida nos seguintes projetos

- **CADIVAFOR – “Catalogación, digitalización y Valorización de las fortalezas de la frontera Galicia - Norte de Portugal”**, financiado por INTERREG IIIA-UE. Duración: 2005 - 2008.
- **FAROS - “Factores humanos en la metodología de diseño basados en riesgos”**, o consorcio é formado por 12 sócios, incluindo indústria, universidades e organismos de investigação. Cofinanciado por FP7: Parceiros: Aalto, Alfa Marin Technikh, Brookes Bell LLP, CIS GALICIA, Deep Blue, Hochschule Wismar, Lloyd's Register, Naval Architecture Progress, TallinkGrupp AS, University College London, University of Strathclyde, Teknologian Tutkimuskeskus VTT. Duração: 2012-2015. <http://www.faros-project.eu>. FAROS

é um projeto europeu cujo objetivo principal é desenvolver propostas que incorporem os fatores humanos, baseado em riscos, no projeto denavios.

- **CIPSOA**,projeto orientado para a inspeção de soldadura por arco. Projeto financiado pela PGIDT. Duração: 2004 - 2006. São utilizadas duas técnicas: a gravação e o controlo automático de parâmetros durante a soldadura (permite verificar se os parâmetros são os corretos para o procedimento e se os mesmos saem dos intervalos de controlo) e a visão artificial 3D (realizada por um sistema de inspeção de design próprio).
- **CETROS – “Célula Transportable para la Robotización de la Soldadura”**, Financiado por: Consellería de Innovación e Industria de la Xunta de Galicia. Duración: 2006 - 2009.Duração: 2006 - 2009. Entidades participantes: AIMEN, NEODYN e CIS GALICIA. Desenvolvimento de uma célula de soldadura robotizada e auto-transportável que pode ser colocada na proximidade de peças grandes, graças a um sistema de trilhos, ou ser destacada deles e transportada por um guindaste de pórtico. A célula possui funções especiais como por exemplo: umaprogramaçãomais ágil dos cabos, sistemas de toque para obtenção de pontos das peças e sistemas de registro de parâmetros de soldadura.
- **FISIOROB. "Desarrollo de un Sistema Robotizado Modular que permita asistir a los pacientes en la terapia de neurorehabilitación de extremidades superiores"**. Interconecta 2013. A participação da CIS GALICIA focou-se no desenvolvimento da interface de comunicação entre o robô de reabilitação e a aplicação de Realidade Virtual, e o design e programação dos exercícios de Realidade Virtual para o paciente.
- **SHIPBUILDING 4.0 - “Desarrollo de un proyecto dinamizador de la capacidad innovadora del sector naval gallego”**, 2015. O CIS GALICIA desenvolveu a representação virtual dos três navios para outros tantos estaleiros navais (Metalships, Cardama e Freire), e a virtualização da célula flexível de soldadura por arco de micro painéis navais.
- **FutureFacing - "Acabados y revestimientos del mueble: de la fabricación tradicional a la industri 4.0"**, ERAMUS + 2016. Duração: setembro de 2016 - agosto de 2019. O objetivo fundamental do projeto focou-se na transferência de conhecimento sobre acabamentos e revestimentos de móveis. Serão gerados conteúdos formativos, um simulador virtual de envernizamento e uma base de dados de produtos e fabricantes, etc.

3 Tecnologias facilitadoras 4.0

Nesta secção, e baseada na experiência do consórcio, são apresentadas algumas das tecnologias4.0 com potencial de serem aplicadas na indústria naval e metalomecânica, as quais ao serem adotadas poderão permitir às empresas do sector realizar um salto tecnológico importante para a sua sustentabilidade a médio e longo prazo.

3.1 Logística Interna baseada em AGVs

Os AGVs (*Automated Guided Vehicle*), e manipuladores móveis, têm se tornado numa ferramenta estratégica importante nas Fábricas do Futuro. Num ambiente industrial muito competitivo, estes podem contribuir para o aumento da produtividade e diminuição dos custos associados ao sistema de logística interna, garantindo um fluxo de materiais eficiente e assegurando a entrega dos mesmos na estação de trabalho correta no tempo certo. Adicionalmente, a introdução deste tipo de sistemas nas empresas permite ainda libertar os operadores para tarefas mais valorizadoras quer ao nível humano quer ao nível do produto final.

Apesar destas mais valias, o número de empresas do sector naval e metalomecânico que utilizam estes tipos de soluções logísticas é ainda reduzido. Existe a necessidade de desenvolvimento de plataformas móveis de baixo custo, adaptadas ao contexto do sistema produtivo do sector, nomeadamente através do:

- Desenvolvimento de sistemas de navegação de baixo custo;
- Desenvolvimento de mecanismos de aumento da robustez e fiabilidade das plataformas móveis robóticas em ambientes dinâmicos, nomeadamente no âmbito da aplicação em contexto industrial de metodologias de localização e navegação em ambientes não-estruturados e sem marcadores físicos;
- Desenvolvimento de mecanismos de cooperação homem-robô e robô-robô que flexibilizam a utilização de uma frota de robôs móveis industriais em ambientes pouco estruturados.
- Desenvolvimento de serviços que facilitem a instalação e configuração das plataformas móveis robóticas, em linha com os paradigmas da Indústria 4.0. O desenvolvimento de interfaces que permitam a utilização de serviços web para a criação de mapas ea disponibilização de procedimentos de programação fáceis constituem uma ferramenta fundamental para responder à variabilidade produtiva;
- Desenvolvimento de mecanismos e serviços de integração da frota de robôs móveis industriais com os sistemas logísticos e de produção.

3.2 Interface Homem Máquina Avançados

A realidade aumentada é uma das tecnologias de ponta envolvidas na tendência da indústria 4.0. É uma tecnologia que só agora atingiu o nível certo de maturidade para ser empregue em ambiente industrial. Da experiência do consórcio do projeto MANUFACTUR4.0 podemos enumerar algumas das questões críticas que tornam as operações no chão de fábrica menos eficientes, nomeadamente:

- Erros Humanos devido à sobrecarga de informação resultante de quantidades excessivas de procedimentos a recordar, bem como à dificuldade de identificação dos pontos de intervenção exatos.
- Atraso no tempo de execução das tarefas devido à utilização de ferramentas erradas e à falta de formação dos operadores.

Todos os puntos enumerados anteriormente se traducen no incremento de custos para a empresa asociados a operacións máis longas, erros recorrentes e danos causados nos produtos debido à execución de procedementos incorreos.

Assim a aplicación de técnicas de realidade aumentada na industria pode contribuir para un aumento significativo do desempeño dos operadores na execución das súas tarefas [1, 2].

A gama de posibles casos de aplicación de realidade aumentada na industria envolve quase todos o tipo de operacións asociados ao chão de fábrica. Estas operacións van desde o apoio na execución das actividades básicas de fabricación, ao control de calidade, segurancia entre outros.

3.3 Impacto na Industria Metalomecánica

Hoje em dia, os fabricantes de estruturas metálicas están focados en mejorar a eficiencia do proceso de produción e ser menos dependentes de medios externos. Nos procesos de soldadura e corte na fabricación de estruturas, este cenário aínda non ocorre, unha vez que a maioría do traballo require a utilización de fontes de información externas para que poidan ser executadas de forma fiable e eficiente. Nos días de hoje, no chão de fábrica é aínda posible de verificar operadores a introducir información à man en máquinas CNC, ou a realizar montaxes con fita métrica e giz/riscador.

Nesta industria, e da experiencia dos socios do proxecto MANUFACTUR 4.0 a aplicación de técnicas de realidade aumentada ou *de projectionmapping* trará un grande impacto no aumento de eficiencia e eficacia no que ás tarefas dos operadores humanos diz respeito.

3.4 Digitalización da Fábrica

A industria é un elemento esencial da cadea de valor, con elevada importancia na economía nacional e coesión social. Para manter a competitividade deste sector e manter o seu crecemento, é imperativo que estes sectores (naval e metalomecánica) invistan en innovación, incorporando novas tecnoloxías e sistemas baseados no coñecemento, sen esquecer un mundo dixital en forte desenvolvemento, alinhando os seus procesos de produción e produtos a esta realidade.

Como resposta a esta crecente necesidade surge o paradigma Industria4.0 que defende a completa dixitalización e integración da cadea de valor industrial, visando a produción con recurso a tecnoloxías de información e comunicación máis avanzadas. O motor que suporta este novo paradigma é a crecente dixitalización da economía e da sociedade, que ven mudar a forma como a produción será realizada no futuro. Após a máquina a vapor, a especialización do traballo e utilización da electricidade na produción en masa, e a utilización de sistemas electrónicos e informáticos na produción, as chamadas fábricas intelixentes, con sistemas ciber-físicos, vñm agora determinar a cuarta revolución industrial.

A base técnica para tal é a combinação de tecnologias de informação e comunicação com tecnologias de automação, o que possibilita a obtenção de níveis de comunicação cada vez mais elevados em rede intra-organizacional, em que pessoas, máquinas, equipamentos, sistemas de logística e produtos poderão comunicar entre si de forma inteligente tornando os processos de fabrico mais eficientes e flexíveis através de sistemas de autogestão. Ao ligar em rede as empresas na cadeia de abastecimento será possível otimizar não só o processo de produção, mas toda a cadeia de valor. A informação disponível em tempo real de toda a cadeia de abastecimento, produção e distribuição irá permitir, por exemplo, que as empresas reajam à disponibilidade de certas matérias-primas, a necessidades imediatas dos clientes e os processos de produção possam ser controlados para economizar recursos e energia.

A “digitalização” da indústria irá permitir recolher informações de todo o ciclo de vida do produto - desde a conceptualização do produto e desenvolvimento, passando pela produção, utilização e manutenção até à reciclagem. Esta informação poderá ser utilizada na criação de novos produtos, permitindo avaliar, e.g., a viabilidade económica e o impacto ambiental que esse novo produto terá, logo na fase de desenvolvimento.

3.5 Programação Off-line de Robôs Industriais

Atualmente, a programação de robôs industriais é normalmente executada manualmente através da utilização de consolas de programação (*teachpendant*). Esta metodologia de trabalho requer a presença de operadores especializados (com conhecimentos específicos consoantes o modelo e marca do robô) e a respetiva paragem da célula robotizada. Assim para peças complexas ou para produção de pequenos lotes, este processo de programação pode ser custoso. Alternativamente, os ambientes de programação off-line estão a ser utilizados para evitar que o robot pare durante as tarefas de programação, uma vez que estas são executados num PC à parte sem a necessidade de interagir com o *teachpendant*. Não obstante, embora os pacotes de simulação off-line sejam válidos para uma ampla gama de aplicações, está técnica requer conhecimentos em ambiente de programação off-line e não reduz necessariamente o tempo de programação.

Procura-se, portanto, eliminar a programação manual de trajetórias mediante a geração automática off-line baseado nos modelos e formatos de ficheiro CAD/CAE/CAM/BIM.

Os parceiros do projeto MANUFACTUR4.0 trabalham em linhas relacionadas com este tipo de geração de trajetórias automática para soldadura e maquinação:

- Análise de arquivos DXF com uma estrutura determinada. No caso da soldadura o arquivo CAD tem uma estrutura determinada de camadas na qual se indica o tipo de cordão a realizar e o sistema automaticamente gera as trajetórias com os parâmetros adequados
- Extração de informações através de uma interface num programa de CAD. Através da criação de um Workbench num programa CAD, no qual o utilizador pode seleccionar os cordoes que deseja soldar, o programa gera automaticamente as trajetórias e as descarrega para o robô.

- **Análise de arquivos IFC (*Building Information Modeling - BIM*)** A metodologia BIM tem vindo a ser cada vez mais adotada pelos grandes *players* do sector da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), tendo vindo a materializar a digitalização das fábricas ao permitir a gestão integral do ciclo de vida dos edifícios, através de modelos digitais de informação [3]. Mais concretamente, os ficheiros BIM são ficheiros que representam de forma confiável um edifício, fornecendo suporte para a tomada de decisão nas fases de desenho e fabricação, produzindo documentação de elevada qualidade para a construção, incluindo desenhos técnicos e estimação de custos. Esta informação constantemente atualizada e acessível dá a arquitetos, engenheiros, construtores e proprietários uma visão global clara de todos os seus projetos, bem como a capacidade de tomar, de forma mais rápida, decisões fundamentadas. Os benefícios do BIM são fortemente dependentes da padronização de formatos que irá apoiar a partilha de informação entre os diferentes intervenientes na indústria da construção. O padrão IFC (*Industry Foundation Classes*) [4] é a chave para garantir que os projetos desenvolvidos por diferentes fornecedores de software podem ser reutilizados de forma consistente. O IFC acrescenta uma linguagem comum para a transferência de informações entre diferentes aplicações BIM, mantendo o significado das diferentes peças de informação na transferência. Isto reduz a necessidade de remodelar a mesma construção em cada aplicação diferente. O IFC acrescenta ainda alguma transparência ao processo, por exemplo as quantidades podem ser retiradas a qualquer momento durante o decurso do projeto, sendo que o custo pode ser estimado permanentemente controlando o modo como as alterações recentes afetam o orçamento. No que diz respeito à fabricação o formato de arquivos IFC preenche uma lacuna aberta na troca de informações entre o software de design e de projeto, e os equipamentos de fabrico. Ao longo dos últimos anos, o principal formato de arquivo utilizado foi o DSTV. Este formato de arquivo antigo é limitado a descrições geométricas de peças únicas, mostrando algumas limitações que promoveram o desenvolvimento de soluções *ad-hoc*. No entanto, o sucesso razoável do formato de arquivo CIS /2 no segmento do aço estrutural, especialmente nos EUA [5], levou ao surgimento de uma tendência que envolve três grandes *players* europeus da área [6, 7] para a utilização de normas completamente integradas no IFC, que é o único verdadeiramente abrangente e representativo de todos os produtos de construção. Não desprezando o potencial do IFC em termos gerais, a completa especificação dos cordões de soldadura no software de projeto e design (por exemplo o software Tekla) é ainda relativamente recente [8,9].

Recorrendo da interpretação destes ficheiros, criados em fase de projeto, torna-se possível a geração automática de trajetórias para robôs já com a parametrização de soldadura de forma completamente automática e transparente para o utilizado da célula robotizada.

3.6 Visão Artificial na Industria

A visão artificial representa uma das ferramentas mais relevantes na indústria 4.0. A localização de peças, os processos de inspeção e controlo de qualidade, suporte à produção, segurança industrial e controlo de processos são ações que envolvem sistemas de processamento de imagem.

3.6.1 Reconhecimento e Localização

Os algoritmos de análise de imagem constam de diferentes etapas para a correta extração de informação, desde:

- A seleção do sistema de aquisição de imagem (câmara, lente, iluminação.).
- Pré-processamento cujo objetivo é melhorar a qualidade informativa da imagem adquirida. Por exemplo, melhorar o contraste ou realce de algumas características da imagem, como bordas ou áreas.
- Segmentação, fase onde se divide a imagem em áreas com diferentes significados para posterior análise independente. Podem ser do tipo morfológico (área, perímetro) ou baseadas em características como a cor ou textura.
- Pós-processamento, uma vez que as tarefas de segmentação geralmente não dão um resultado exato da delimitação dos objetos ou regiões de interesse - bordas imprecisas, regiões sobrepostas, etc.
- Classificação e interpretação de cada região.

No caso da localização de peças, o sistema de visão deve abranger a área onde o trabalho é realizado, sendo desenvolvido um software para analisar a imagem capturada e localizar a peça, para depois calcular a sua posição e a orientação. Na Figura 1. é ilustrado dois exemplos de localização de peças, um baseado numa metodologia 2D e outro 3D.

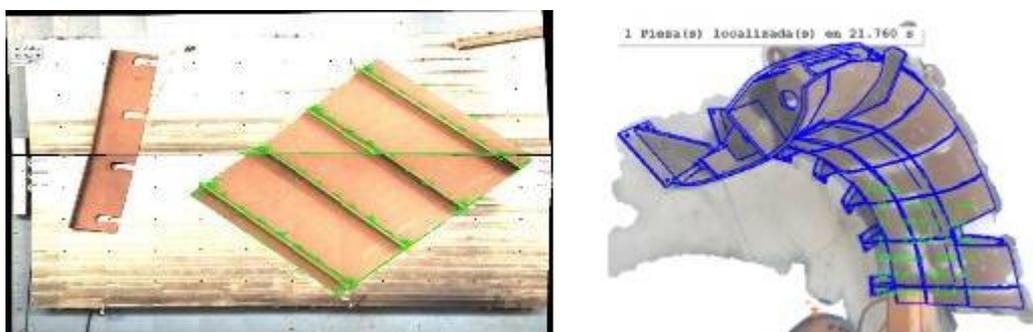


Figura 1. Exemplo de localização 2D e 3D baseado no *matching* do modelo CAD da peça.

No entanto, a integração de estes sistemas de visão artificial num ambiente industrial apresenta uma maior complexidade em termos de componentes do sistema – seleção da iluminação, câmara e lente, etc – e no que se refere aos algoritmos de localização. A iluminação é um dos aspetos mais decisivos, uma vez que no chão de fábrica a iluminação ambiente flutua e provoca distorções na imagem. Se à partida for escolhida uma técnica de iluminação adequada, é espectável o aumento da precisão e robustez do sistema de visão sendo que a etapa pré-processamento é também simplificada.

3.6.2 Scan de soldaduras – caso na industria naval e metalomecánica

No caso concreto da soldadura, para uma localização mais precisa também se utilizam sensores do tipo 2D Laser scan, constituído por um emissor laser linha e uma câmara, para a aquisição de imagem. Estes sistemas de visão têm como função realizar o scan da junta a soldadura e baseia-se na no princípio da triangulação, ver Figura 2, para retirar o respetivo modelo 2D e 3D, este último se os dados foram acumulados (recorrendo a um software dedicado) ao longo do movimento do sensor ao longo da soldadura. Recorrendo a este tipo de sensores conseguem-se normalmente alcançar grandes precisões (na ordem dos $\pm 0,30\text{mm}$) na localização do cordão de soldadura.

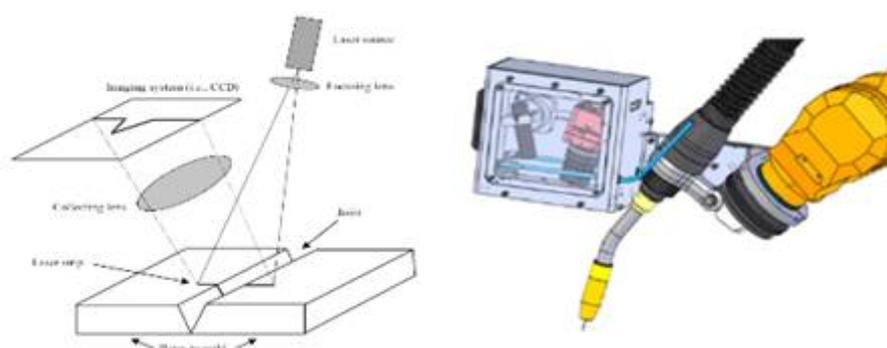


Figura 2. Princípio de funcionamento do 2D Laser Scanner e exemplo de uma possível configuração quando acoplado a um robô industrial

Habitualmente, no processo de soldadura industrial são necessárias elevadas precisões que podem ser alternativamente alcançadas com recurso a perfilómetros. No entanto estes não têm a flexibilidade para realizar o scan de peças de grandes dimensões, algo que é possível recorrendo aos sensores do tipo 2D Laser Scanner, recorrendo por exemplo ao *set-up* ilustrado na Figura 2.

3.6.3 Software para o processamento de dados 2D e 3D

Para o desenvolvimento de algoritmos de visão artificial, existem diferentes aplicações com software proprietário, como *Halcon*, e também software livre, como o *OpenCV* para o tratamento de imagens 2D e *PCL (PointCloudLibrary)* para o tratamento de nuvens de pontos 3D.

A possibilidade de se recorrer a software livre permite realizar aplicações de visão com menores custos e com liberdade de redistribuição. No entanto o software proprietário possui suporte técnico e programas especificamente desenvolvidos para uma tarefa em concreto, com algoritmos testados e validados em ambiente industrial.

3.7 Control de proceso de maquinación e soldadura

Na automação do proceso de maquinación e soldadura, não se atua apenas na correção da trajetória de soldadura através de visão industrial, é também necessário realizar outro tipo de correções.

(i) no caso da maquinación, **a compensação da tensão pneumática** permite aplicar sobre a superfície a maquinaar uma força constante e parametrizável pelo utilizar, permitindo desta forma compensar possíveis variações de orientação sobre a superfície da peça a processar, e contrariar assim o próprio peso da ferramenta.

O sistema conta com um cilindro pneumático como elemento atuador, uma célula de carga para a medição da força e um acelerómetro para a medição da orientação.

A todos estes elementos de sensorização e atuação, é adicionado um autómato, encarregado de realizar as tarefas de aquisição, controlo e comunicação, oferecendo assim as características industriais as quais o dispositivo de compensação de tensão deverá estar dotado. Ver Figura 3.

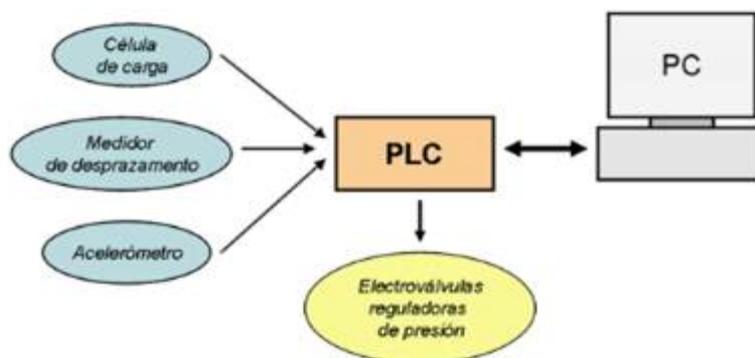


Figura 3. Diagrama de interconexão dos diferentes elementos de comunicação

(ii) No caso da soldadura, o **seguimento de junta** tem como função corrigir a trajetória de soldadura em tempo real, permitindo assim adaptar e absorver as diferenças entre a trajetórias teórica programada no equipamento e a real, causada por possíveis distorções na peça, que por sua pode ser causada por processos anteriores ou pelo corrente processo de soldadura.

No caso do pacote tecnológico da KUKA (ArcSense 2.0), ver Figura 4, o seguidor de junta é do tipo *Throug-The-Arc*, que funciona através da medição da corrente durante o processo de soldadura, em combinação com um movimento oscilante da tocha do robô, o que permite conhecer se se está a aproximar ou afastar da junta, e assim enviar as correções de posição para o robô.



Figura 4. Esquema do sistema de seguimento de junta da KUKA

Aparte do seguidor de junta, existen ainda outros métodos para corrigir a trajetórias e alcanzar una maior precisión, como é o caso do sistema baseada no sensor 2D Laser Scanner presentado anteriormente.

3.8 Control de calidad e inspeção de proceso

Os standards de calidad existentes (tanto no sector naval como na fabricación de componentes de elevada responsabilidade no sector metalomecánico) exigen rigorosos controles em todos os procesos productivos. Com especial interesse temos o caso do control e inspeção dos cordões de soldadura bem como o control dimensional do produto. A inspeção do produto também é uma tarefa que maioritariamente se realiza de forma manual (mediante inspeção visual ou recorrendo a técnicas de ensaio não destrutivas) e que requiere a presenza de técnicos cualificados. Não obstante, com a automação do proceso de inspeção, é possível reducir o tempo de ciclo que, por sua vez, leva a uma redução nos custos.

3.8.1 Inspeção 2D e 3D de cordões de soldadura recorrendo a visión Artificial.

Os cordões de soldadura defectuosos requieren un retrabalho custoso na sua reparación, e necesariamente un aumento da quantidade de matéria prima consumida. Em alguns casos, estes tempos de reparación podem atingir 15-20% mais considerando os tempos totais do proceso de transformación. Em muitos proceso de control de soldadura a inspeção não é continua não sendo assim detetados pequenos defectos, ou a própria inspeção dificulta o cumprimento dos tempos de ciclo. Aquí os sistemas de visión artificial podem desempenhar un papel fundamental.

Os sistemas de visión artificial 2D e 3D permiten a inspeção de características geométricas tais como o comprimento, a largura, a posición e o volume do cordão de soldadura. A partir da triangulación, mediante o scan utilizando una cámara 3D ou laser, pode-se inspeccionar a geometria do cordão de soldadura e obter dados como a altura, que permite por sua vez determinar em cada zona o grau do defecto por exceso de velocidade,

dependendo dos níveis a serem alcançados segundo a norma; ou a largura da soldadura, que permite a medição de uma das variáveis que garantem a conformidade com a qualidade do cordão em termos de força.

A precisão alcançada pelos novos sistemas de visão artificial permite garantir o controlo de qualidade dessas variáveis, mesmo em processos de soldadura de alta precisão dimensional e baixa entrada térmica, como a baseada em tecnologia laser (Figuras 5 e 6), justificando a sua aplicação em aplicações com tolerâncias menos exigente, como as que estão previstas no projeto MANUFACTUR4.0.

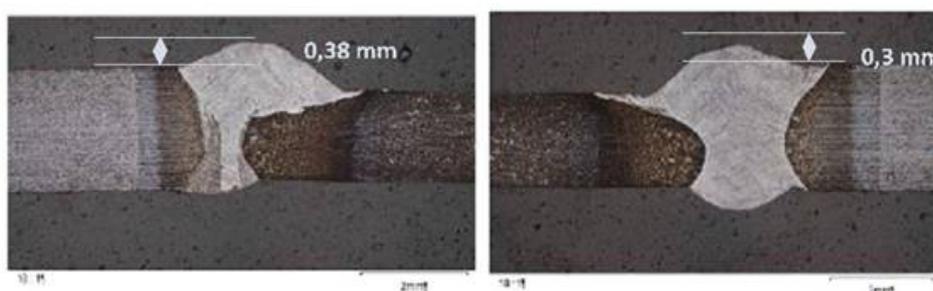


Figura 5. Exemplo de macrografia de cordões de soldadura híbrida laser – MAG para a geração de componentes multimaterial do tipo TWB em aços para estampagem a quente

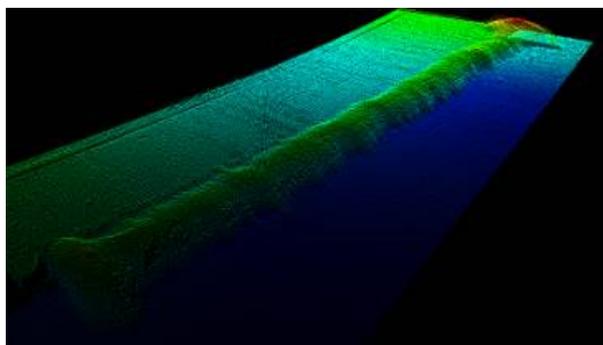


Figura 6. Exemplo de cordão de soldadura TWB laser com adição de fio após calibração do sistema

3.8.2 Monitorização de defeitos na soldadura a laser utilizando sensores de imagem

Neste caso recorre-se a sensores infravermelhos na gama MWIR coaxial, capazes de operar a velocidades de 1kHz. O sistema baseia-se na análise das diferenças de imagem quando ocorrem defeitos em relação ao padrão processado (ver Figura 7). Este tipo de sistemas permite detetar defeitos, como a presença de furos, falhas de

penetração, mordidas na face do cordão ou a presença de poros, sendo que o sistema deteta as diferenças na imagem quando ocorre um defeito.

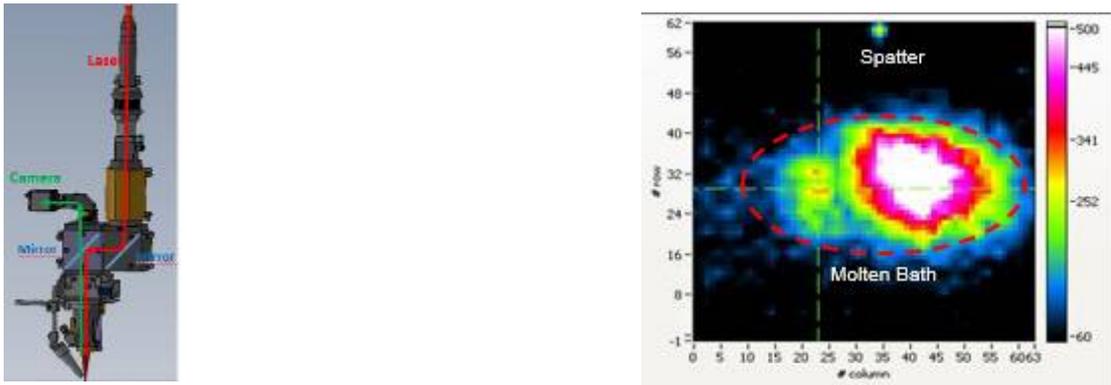


Figura 7. Exemplo de configuração para deteção de defeitos em soldadura a laser com sensores de IR e imagem de monitorização adquirida durante o processo de soldadura - projeto LASHARE LASPRO, Laser equipment ASsessment for HighimpActinnovation in themanufactuRingEuropeanindustry, Grant agreementnumber: 609046

3.8.3 Controlo dimensional e superficial de peças mecanizadas

Atualmente, com algoritmos de visão artificial 2D e 3D, também é possível verificar as tolerâncias dimensionais e geométricas ou verificar o grau de precisão de um processo de acabamento. Com o controlo por visão artificial, pode-se obter precisões de décimas de milímetro no controlo dimensional, dependendo da aplicação. Essa técnica integrada no processo de fabricação reduz o tempo de ciclo, uma vez que a inspeção manual atualmente realizada não seria necessária.

4 Soluções comerciais e patentes relacionadas

4.1 Automação de processos especializados de soldadura e maquinação no setor naval e metalomecânico.

Na atualidade, existem soluções comerciais para a automatização de processos especializados de soldadura e maquinação no setor metalomecânico e naval.

Um dos exemplo é a célula robotizada de soldadura de painéis que a Kranendonk⁴ propõe, ver Figura 8. Trata-se de uma célula com pórtico no qual vários robôs estão montados sobre os eixos verticais, sendo que a sua programação é realizada utilizando o software RINASWELD a partir de um modelo CAD 3D. O software RinasWeld gera automaticamente os programas com as trajetórias do robô tendo em conta colisões e os parâmetros de soldadura previamente definidos no modelo CAD. Para além disso, este software proprietário é capaz de otimizar o processo minimizando a deformação devido ao calor gerado durante o processo de soldadura. A principal desvantagem desta solução é o seu custo, que para pequenas e medias empresas não é desprezável.

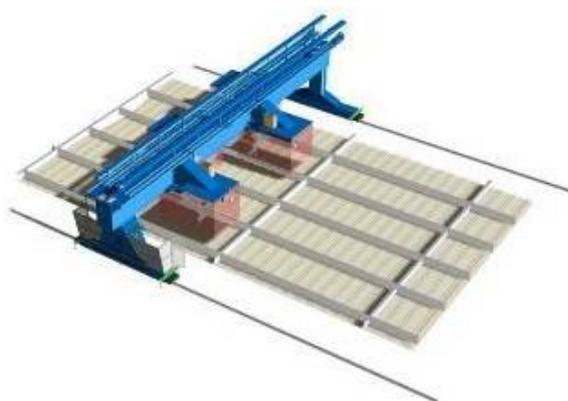


Figura 8. Célula Robotizada da Kranendonk

Em linha com o desenvolvimento da Kranendonk, os estaleiros de Navantia, na Baía de Cádiz, desenvolveu um sistema de soldadura robotizada com programação manual, de alta precisão e máximo controlo das trajetórias de movimento do robô, conseguindo soldaduras em todo o tipo de geometrias em projetos navais e offshore, ver Figura 9. Esta célula não possui um sistema de visão artificial para a localização da peça. Em vez disso, a programação das trajetórias é realizada manualmente com um sistema Hexagon. O operador, com o equipamento de medição, tem que ajustar cada ponto da trajetória na peça a ser soldada e a trajetória do robô é gerada automaticamente.

⁴<http://www.kranendonk.com/shipbuilding/panel-welding>



Figura 9. Célula de Soldadura de Navantia (Cádiz)

Para além destas outras empresas como por exemplo a PEMA⁵, inrotech⁶, xyzmotion⁷, ESAB⁸eMARTEC⁹possuem também no seu portfolio células robotizadas para a soldadura de estruturas na industria naval.

Relativo ao processo de maquinação, a BCNVISION¹⁰e em colaboração com o fabricante de máquinas Tecnowys, desenvolveu um novo projeto de visão artificial para o controlo dimensional e superficial de eixos com tolerâncias de até 6 micron em algumas dimensões, ver Figura 10. A aplicação conta com três estações de trabalho nas quais se realizam os distintos controlos, por exemplo, o comprimento total da peça com tolerância de até 0.05mm, a largura com uma tolerância de 0.05 mm, e o diâmetro com uma tolerância de 6 micras.

⁵ [http:// pemamek.com/](http://pemamek.com/)

⁶<http://www.inrotech.com/>

⁷<http://www.xyzmotion.eu/>

⁸<http://www.esab.com/automation/en/industries/Shipbuilding-and-Offshore.cfm>

⁹<http://www.martec.es/>

¹⁰ <http://www.bcnvision.es/blog-vision-artificial/control-dimensional-superficial-ejes/>

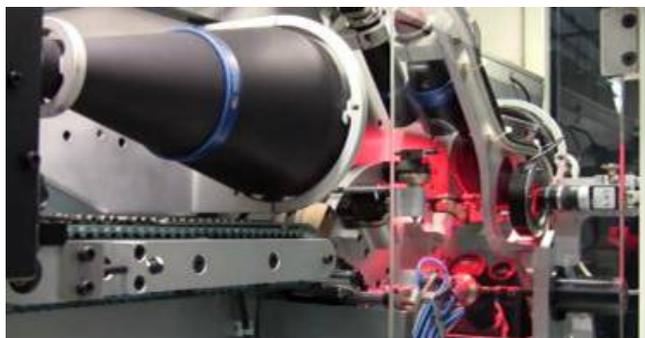


Figura 10 Protótipo para o controlo dimensional baseado em visão artificial

Uma das soluções para o corte por plasma de tubos é a célula robotizada RCTC-3D apresentada na Figura 11. É uma máquina versátil com 9 eixos servo-controlados, o que possibilita o corte 3D de qualquer tipo de geometria. Esta célula foi projetada para a fabricação de tubos de caldeiras e permite a construção de redes de tubos com conexões complexas, trabalhando em faixas de diâmetro de 50mm a 1200mm, comprimentos de 400mm a 12000mm e espessuras de 0.60mm a 50mm. O tubo é suspenso por uma placa automática e tem um conjunto de rolos, permitindo que o tubo rode e evite os deslizamentos. A célula possui ainda um sensor na tocha de corte para obter a dimensão real do tubo e corrigir as trajetórias que são geradas offline através de um software CAD / CAM, com base no design 3D da peça.



Figura 11. Célula Flexível de corte de tubos por plasma

Uma outra solução para o corte de tubos e vigas por plasma, é a solução apresentada pela SARKKIS Robotics¹¹. Nesta solução, ver Figura 12, a estrutura metálica, tubo ou viga, mantém-se estática sendo que o robô se

¹¹ www.sarkkis.com/

encontraacoplado a um eixo circular garantindo desta forma o alcance necessário para o processamento completo da estrutura metálica.

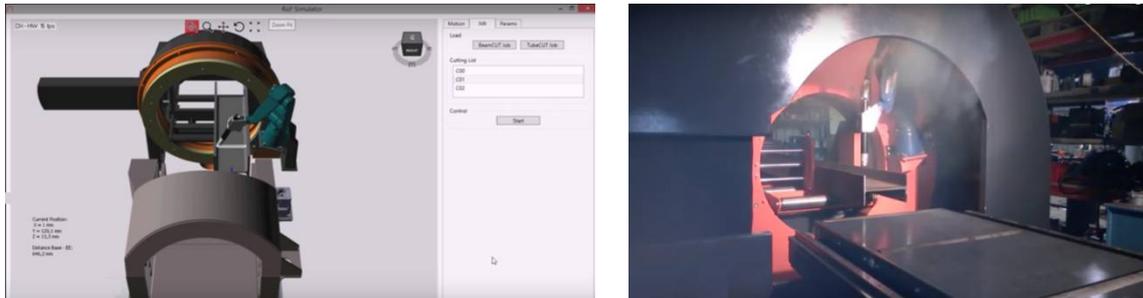


Figura 12 Célula de Soldadura de tubos e vigas SARKKIS Robotics

Para além disso conta com um sensor do tipo laser ponto para detetar a posição da estrutura metálica e corrigir as trajetórias geradas automaticamente a partir do modelo CAD.

Por sua vez a Zeman¹², ver Figura 13, desenvolveu uma célula robotizada para a soldadura de acessórios em vigas. Esta célula é bastante complexa na medida em que são utilizados dois robôs industriais e, portanto, alguns cuidados na geração de trajetórias têm de ser tidos em conta devido à possibilidade de colisão.



Figura 13 Célula de Soldadura de vigas ZEMAN

¹² <http://www.zebau.com/>

Nesta célula os acessórios a serem ensamblados na estrutura metálica principal, viga, são inseridos manualmente por um operador humano numa mesa. Utilizando um sistema de triangulação laser, movimentado por um dos robôs, estas peças são localizadas. De seguida um dos robôs realiza o *pick-and-place* das peças, enquanto o segundo realiza a soldadura. Mais uma vez para a correção da trajetória de soldadura um laser ponto é utilizado. De notar que a geração de trajetórias dos robôs é realizada de forma automática baseado no modelo CAD.

Na área de soldadura de *sprinklers* em tubos, a empresa ValkWelding¹³ apresenta uma solução automática completa, ver Figura 14.

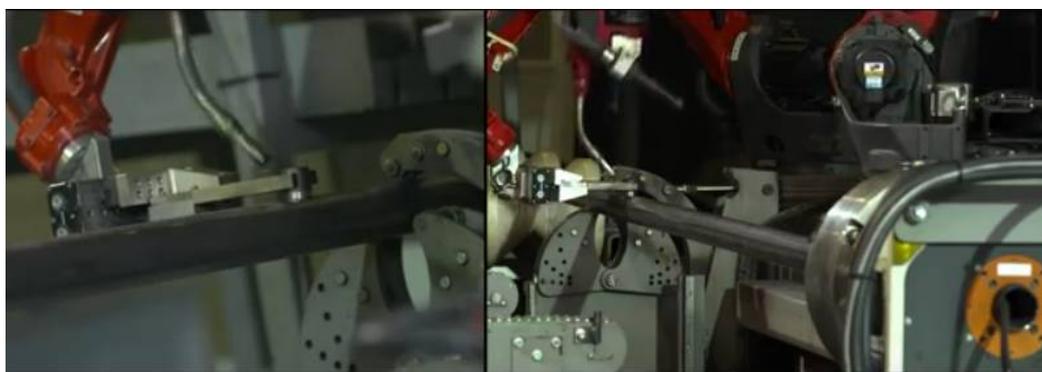


Figura 14 Célula de Soldadura de *sprinkler* em tubos para sistemas de incêndio

Os robôs nesta célula encontram-se fixos, em vez disso, os tubos são colocados na posição e orientação correta. A partir do ponto de alimentação automática de componentes, o conjunto completo é automatizado. O robô de manipulação pega as peças do subconjunto do local de armazenamento e oferece-o ao robô de soldadura na posição correta. O robô de soldadura executa o processo de corte e soldadura dos acessórios.

4.2 Interface Homem Máquina

Na atualidade já existem soluções industriais onde técnicas de realidade aumentada e *projectionmappings* são utilizadas para apoiar os operadores humanos na realização de diferentes tarefas ao nível do chão de fábrica, ver Figura 15.

Considerando técnicas de *projectionmapping*, temos por exemplo o caso da empresa Virtek¹⁴, que fornece soluções de projeção laser e controlo de qualidade que suportam fabricante de uma alargada variedade de

¹³ <https://www.valkwelding.com/en>

¹⁴ <http://www.gerberttechnology.com/prefab-construction/steel/virtek-ltg-steel/>

indústrias especializadas nos processos de montagem, como por exemplo, a indústria aeroespacial, fabricação de chapa e juntas, petróleo e gás natural, fabricação estrutural metálica entre outros.

Um exemplo de um dos produtos que esta empresa fornece é o Virtek LTG. Este sistema projeta um modelo laser dos membros do painel na superfície de trabalho, mostrando aos trabalhadores como montar painéis e subcomponentes. Assim é eliminada a necessidade de o operador utilizar a planos em papel ou usar uma fita métrica, traduzindo-se em aumentos de eficácia e eficiência na execução das tarefas associadas.



Figura 15 Sistema de projecção virtek para construção de estruturas metálicas¹⁵

¹⁵ <http://www.gerberttechnology.com/prefab-construction/steel/virtek-ltg-steel/>

4.3 Logística Interna baseada em AGVs

No que se refere a AGVs para a logística interna, a indústria metalomecânica e naval não possui ainda no mercado soluções que vão de encontro às suas necessidades. Um dos principais problemas nesta indústria é o facto dos seus produtos serem normalmente de grandes dimensões e elevado peso. No entanto existe espaço, nomeadamente na indústria metalomecânica mais fina, para a introdução deste tipo de equipamento.

Um dos maiores concorrentes mundiais, é a empresa ellectric80. É uma empresa especializada na criação de soluções automatizadas para empresas de bens de consumo de movimentação rápida, em particular a indústria da alimentação, bebidas e tecidos, e em outros campos mais diversos, como as indústrias de cerâmica e plástico. Na Figura 16 é apresentado o leque de soluções disponibilizados pela Ellectric80.



Figura 16 Portfólio de soluções comerciais da empresa Ellectric80¹⁶

Uma das principais características que é comum a todos estes equipamentos, é o seu sistema de localização baseado em marcadores artificiais e tecnologia laser.

Outra empresa com bastantes soluções neste área de aplicação é a AGV Group¹⁷. Esta empresa é um fornecedor líder de AGVs, possuindo soluções para a indústria do papel, Aeroespacial, Madeira e mobiliário, Automóvel, Alimentação e bebidas, e para a indústria metalomecânica (ver Figura 17).

¹⁶ <http://www.gerberttechnology.com/prefab-construction/steel/virtek-ltg-steel/>

¹⁷ <http://www.agv-group.com/>



Figura 17 AGV da empresa AGV Group para a indústria da metalomecânica.

5 Conclusão

Este documento constitui o primeiro relatório de Vigilância de Tecnologia, que se apresenta como uma das principais atividades do projeto MANUFACTUR4.0. Este primeiro relatório visa apresentar uma visão geral das principais linhas de desenvolvimento tecnológico 4.0 na indústria naval e metalomecânica. As tecnologias aqui apresentadas foram selecionadas tendo em conta a experiência e o know-how dos parceiros do MANUFACTUR4.0.

Referências

- [1] J. Säski, T. Salonen, M. Liinasuo, J. Pakkanen, M. Vanhatalo, A. Riitahuhta, "Augmented reality efficiency in manufacturing industry: A case study", Proc. NordDesign Conf., pp. 99-109, 2008.
- [2] S. J. Henderson and S. Feiner, "Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret," 2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Orlando, FL, 2009, pp. 135-144.
- [3] Pimenta, Sousa. (UM, 2015). Coordenação das MEP na implementação de modelos BIM
- [4] "Industry Foundation Classes (IFC) data model — buildingSMART." [Online]. Available: <http://www.buildingsmart.org/standards/ifc>. [Accessed: 11-Oct-2013].
- [5] "National Institute of Standards and Technology CIS/2." [Online]. Available: <http://cic.nist.gov/vrml/cis2.html>. [Accessed: 07-Oct-2013].
- [6] "IFC - HGG." [Online]. Available: <http://www.hgg-group.com/en/news/article/ifc-standard-to-bring-steel-fabrication-industry-into-the-bim-workflow/>. [Accessed: 07-Oct-2013].

[7] "IFC standard to bring steel fabrication industry into the BIM workflow - Aktuelles - Ficep." [Online]. Available: <http://www.ficepgroup.com/media-and-events-de/news-de/news-item-de/id=33094475>. [Accessed: 07-Oct-2013].

[8] "Improvements in IFC export | Tekla User Assistance." [Online]. Available: http://teklastructures.support.tekla.com/200/en/rel_200_int_ifc_export_improvements. [Accessed: 22-Feb-2016].

[9] "Weld Preparation: Using Automatic Weld Preparation | Tekla User Assistance." [Online]. Available: http://teklastructures.support.tekla.com/video-tutorials/en/weld_preparation_using-automatic_weld_preparation. [Accessed: 22-Feb-2016]