

**TECNOLOGIA
SETÚBAL**

ESCOLA SUPERIOR
POLITÉCNICO SETÚBAL

Jorge Cantante
Nº201002127

**Sistema de Execução da
Produção como Plataforma de
Decisão Operacional: Uma
Revisão Sistemática da Literatura**

Dissertação do Mestrado em Engenharia de
Produção

ORIENTADOR

Professor Artur Manuel Fortunato Graxinha

Novembro de 2025

Jorge Cantante
Nº201002127

**Sistema de Execução da
Produção como Plataforma de
Decisão Operacional: Uma
Revisão Sistemática da Literatura**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo
Cunha, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Professor Artur Manuel Fortunato
Graxinha, ESTSetúbal/IPS

Vogal: Professor José Pedro Magalhães Lucas,
ESTSetúbal/IPS

Novembro de 2025

*À minha esposa, Emília Cantante,
e aos meus filhos, Diogo Cantante e Camila Cantante,
por todo o amor, força e inspiração que me dão todos os dias.*

“Se tens um sonho, compromete-te com ele.
A audácia contém em si génio, poder e distinção.”
Johann Wolfgang von Goethe

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha sincera gratidão ao Professor Artur Graxinha, orientador deste trabalho, pela disponibilidade permanente, pelo rigor pelo acompanhamento exigente e construtivo ao longo de todo o percurso de investigação.

À Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, deixo o meu profundo reconhecimento pelo suporte institucional e pela qualidade da formação prestada ao longo do meu percurso académico. Ao Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo Cunha, manifesto igualmente o meu reconhecimento pelo apoio e pela valorização do ensino superior politécnico.

À minha esposa, Emília Cantante, deixo um agradecimento muito especial pelo apoio incondicional, pela paciência demonstrada nos momentos de maior exigência e pela força constante que sempre me transmitiu ao longo deste caminho.

Aos meus filhos, Diogo Cantante e Camila Cantante, a minha mais profunda gratidão pela compreensão, pelo carinho diário e pela motivação que representam na minha vida, sendo a maior razão para nunca desistir.

A todos, deixo o meu reconhecimento e o meu mais sincero agradecimento.

Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial

Na versão revista deste trabalho, foi utilizada a ferramenta baseada em IA generativa ChatGPT-5.1 e NotebookLM para apoiar a melhoria linguística e a verificação gramatical. Todo o conteúdo gerado com recurso a IA foi integralmente revisto e validado pelo autor, garantindo a sua precisão, integridade e conformidade com os requisitos académicos. O autor assume total responsabilidade pelo manuscrito final.

Resumo

O Sistema de Execução da Produção (MES) tem evoluído significativamente. Esta dissertação realiza uma revisão sistemática sobre o seu papel na coordenação entre planeamento e operações em contexto digital, aplicando o protocolo *PRISMA 2020*. Foram analisados 109 artigos através de bibliometria e análise de conteúdo. Nos 40 casos industriais com dados quantitativos verificam-se melhorias até 20% na eficiência produtiva e reduções até 30% nos tempos de ciclo. Persistem limitações na segurança e na descrição de arquiteturas. Conclui-se que o MES evolui de sistema de registo para plataforma de decisão integrada suportada por tecnologias digitais avançadas.

Palavras-chave: Sistema de Execução da Produção (MES), Indústria 4.0, Revisão sistemática, Desempenho operacional, Integração tecnológica, Indústria.

Abstract

The Manufacturing Execution System (MES) has evolved significantly. This thesis conducts a systematic review of its role in coordinating planning and shop-floor operations in digital environments, applying the PRISMA 2020 protocol. A total of 109 articles were analysed through bibliometric and content analysis. Across 40 industrial cases with quantitative data, improvements of up to 20% in productive efficiency and reductions of up to 30% in cycle times were observed. Limitations persist regarding security and architectural detail. The study concludes that MES has evolved from a recording system into an integrated decision-support platform enabled by advanced digital technologies.

Keywords: Manufacturing Execution System (MES), Industry 4.0, Systematic Review, Operational Performance, Technological Integration, Industry.

Índice

Agradecimentos.....	ii
Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice.....	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas e Acrónimos	xii
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. A Centralidade Atual do MES na Coordenação Operacional.....	2
1.2. Identificação do problema e relevância industrial	2
1.3. Definição, evolução e contributo do MES para a criação de valor na prática industrial	3
1.4. Lacunas na literatura	4
1.5. Objetivos do estudo e questões de investigação.....	5
1.6. Estrutura do documento.....	5
Capítulo 2 - Metodologia	7
2.1. Revisão sistemática com PRISMA 2020.....	8
2.2. Estratégia de pesquisa e fontes de dados	9
2.3. Critérios de inclusão e exclusão	9
2.4. Processo de triagem e elegibilidade	9
2.5. Ferramentas e procedimentos analíticos	10
2.6. Síntese e ligação aos resultados	10

Capítulo 3 – Resultados obtidos	11
3.1. Análise bibliométrica.....	12
3.1.1. Análise da produção científica anual.....	13
3.1.2. Evolução das citações médias por ano.....	14
3.1.3. Fontes científicas mais relevantes	15
3.1.4. Evolução temporal das fontes científicas	16
3.1.5. Autores mais relevantes.....	17
3.1.6. Instituições mais relevantes	18
3.1.7. Distribuição geográfica das publicações	19
3.1.8. Produção científica por país.....	20
3.1.9. Países mais citados	21
3.1.10. Documentos mais citados globalmente.....	22
3.1.11. Palavras-chave dos autores.....	23
3.1.12. Tópicos Emergentes de Investigação	24
3.1.13. Rede de Coocorrência de Termos	25
3.1.14. Mapa Temático	26
3.2. Análise de conteúdo.....	28
Capítulo 4 - Discussão	44
4.1. A evolução, a implementação e as tendências do MES	45
4.2. Evolução do MES, e o seu papel na arquitetura dos sistemas produtivos	46
4.3. Implementação do MES e integração com tecnologias digitais	47
4.4. Tendências e direções futuras do desenvolvimento do MES.....	48
4.5. Síntese crítica do estado da arte do MES	50
Capítulo 5 - Conclusões	51
5.1. Síntese interpretativa dos resultados e contributos do estudo	52
5.2. Limitações metodológicas e restrições da evidência disponível.....	54
5.3. Orientações para investigação futura e desenvolvimento tecnológico	55

Referências Bibliográficas	57
Apêndice I - Tabela de Análise Técnico-Científica dos Artigos MES.....	68

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Fluxograma do processo PRISMA 2020 aplicado à revisão sistemática sobre o MES.	8
Figura 3.1 - Produção científica anual.....	13
Figura 3.2 - Citações médias por ano.	14
Figura 3.3 - Fontes científicas mais relevantes.....	16
Figura 3.4 - Evolução temporal das fontes científicas.....	17
Figura 3.5 - Autores mais relevantes.	18
Figura 3.6 - Instituições mais relevantes.....	19
Figura 3.7 - Distribuição geográfica das publicações científicas.....	20
Figura 3.8 - Produção científica por país.	21
Figura 3.9 - Países mais citados.....	22
Figura 3.10 - Documentos mais citados globalmente.....	23
Figura 3.11 - Nuvem de palavras-chave dos autores.....	24
Figura 3.12 - Evolução temporal dos principais tópicos de investigação.....	25
Figura 3.13 - Rede de coocorrência de palavras-chave.....	26
Figura 3.14 - Mapa temático das palavras-chave.....	27
Figura 3.15 - MES, sistema coordenador.....	30
Figura 3.16 - Principais mecanismos de impacto reportados no universo dos 109 artigos.....	31
Figura 3.17 - Distribuição das tecnologias da Indústria 4.0 integradas no MES.....	32
Figura 3.18 - Tecnologias I4.0 nos 40 casos industriais 2004–2025.....	33

Figura 3.19 - Tendências centrais da integração tecnológica com o MES 2004–2025.	34
Figura 3.20 - Dez dimensões de suporte do MES	35
Figura 3.21 - Indicadores com maior variação positiva após integração com o MES.....	38
Figura 3.22 - Ciclo “medir-decidir-agir” no MES	38
Figura 3.23 - Integração gradual de IA e analítica explicável no MES	39
Figura 3.24 - Modelo comum de dados e interoperabilidade entre MES, ERP e SCADA	40
Figura 3.25 - Arquitetura modular e integração entre <i>cobots</i> e MES.....	41
Figura 3.26 - Síntese evolutiva do MES	41
Figura 4.1 - Síntese interpretativa da evolução e tendências do MES	49

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Interpretação dos quadrantes do mapa temático.....	26
Tabela 3.2 - Síntese quantitativa por tipo de estudo.	28
Tabela 3.3 - Funções do MES e mecanismos de impacto.	31
Tabela 3.4 - Resultados após a integração com o MES dos casos industriais.	36
Tabela 3.5 - Evidência empírica e implicações do MES enquanto plataforma de decisão industrial.	42

Lista de Siglas e Acrónimos

AI	Inteligência Artificial (<i>Artificial Intelligence</i>)
API	Interface de Programação de Aplicações (<i>Application Programming Interface</i>)
APS	Planeamento e Sequenciação Avançada (<i>Advanced Planning and Scheduling</i>)
Auto-ID	Identificação Automática (<i>Automatic Identification</i>)
BD	<i>Big Data</i>
Bibliometrix	Pacote Bibliometrix em R (<i>Bibliometrix package</i>)
Biblioshiny	Interface Biblioshiny em R (<i>Biblioshiny interface</i>)
Cloud	Serviços em nuvem (<i>Cloud Computing</i>)
CPS	Sistemas ciber-físicos (<i>Cyber Physical Systems</i>)
CSV	Ficheiro de valores separados por vírgulas (<i>Comma Separated Values</i>)
DMZ	Zona Desmilitarizada (<i>Demilitarized Zone</i>)
DT	Gémeos Digitais (<i>Digital Twins</i>)
ERP	Planeamento de Recursos Empresariais (<i>Enterprise Resource Planning</i>)
FPY	Qualidade de Primeira Escolha (<i>First Pass Yield</i>)
I4.0	Indústria 4.0 (<i>Industry 4.0</i>)
IIoT	Internet das Coisas Industrial (<i>Industrial Internet of Things</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
ISA-95	Norma de integração entre sistemas de empresa e sistemas de controlo (<i>International Society of Automation Standard 95</i>)
IT	Tecnologias de Informação (<i>Information Technology</i>)

ML	Aprendizagem Automática (<i>Machine Learning</i>)
MES	Sistema de Execução da Produção (<i>Manufacturing Execution System</i>)
OEE	Eficiência Global do Equipamento (<i>Overall Equipment Effectiveness</i>)
OPC UA	Arquitetura Unificada de Comunicações de Plataforma Aberta (<i>OPC Unified Architecture</i>)
OT	Tecnologias Operacionais (<i>Operational Technology</i>)
OTD	Pontualidade de Entrega (<i>On-Time Delivery</i>)
PLC	Controlador Lógico Programável (<i>Programmable Logic Controller</i>)
PRISMA 2020	Itens Preferenciais para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>)
QI	Questões da investigação
R	Linguagem e ambiente R para computação estatística (<i>R Project for Statistical Computing</i>)
RFID	Identificação por Rádio Frequência (<i>Radio Frequency Identification</i>)
SCADA	Controlo de Supervisão e Aquisição de Dados (<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)
SCOPUS	Base de dados bibliográfica Scopus (<i>Scopus database</i>)
SECS GEM	Padrão de Comunicação de Equipamentos e Controlo de Semicondutores (<i>Semiconductor Equipment Communication Standard – Generic Equipment Model</i>)
UPH	Unidades por Hora (<i>Units per Hour</i>)
Web of Science	Base de dados bibliográfica Web of Science (<i>Web of Science database</i>)
WIP	Trabalho em Curso (<i>Work in Process / Work in Progress</i>)

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo enquadra o Sistema de Execução da Produção (MES) como elemento central na coordenação entre planeamento e chão de fábrica em ambientes industriais digitais. É apresentada a evolução do MES de sistema de registo para plataforma de decisão integrada na arquitetura das operações. São discutidos os desafios associados à complexidade produtiva, à integração de sistemas e à necessidade de melhoria contínua do desempenho. O capítulo identifica limitações na literatura resultantes da dispersão conceptual e empírica existente. Neste contexto, justifica-se a realização de uma revisão sistemática com base no protocolo *PRISMA 2020*. Definem-se o objetivo geral, os objetivos específicos e as questões de investigação, bem como os contributos científicos e práticos esperados e a estrutura global do documento.

1.1. A Centralidade Atual do MES na Coordenação Operacional

O Sistema de Execução da Produção ou *Manufacturing Execution System* (MES), tornou-se um elemento central na coordenação entre o planeamento e o chão de fábrica [1] [2] [3] [4] em ambientes industriais que evoluem para arquiteturas digitais e conectadas, muitas vezes enquadradas no paradigma da indústria 4.0 ou *Industry 4.0* (I4.0) [3] [1] [2] [5] [6] [4]. A evolução recente dos sistemas produtivos mostra que o MES deixou de ser apenas um repositório de dados [1] [2] [4] e assumiu um papel ativo na orquestração de fluxos de informação, na monitorização contínua e no suporte à decisão operacional em tempo quase real [3] [1] [2] [4], em articulação com tecnologias como internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT), *Big Data* (BD), serviços em nuvem ou *Cloud Computing* (Cloud), sistemas ciber-físicos ou *Cyber Physical Systems* (CPS) e Gémeos Digitais ou *Digital Twins* (DT) [3] [6] [2] [4]. Esta transformação ocorre num contexto em que as empresas enfrentam maior variabilidade de procura e exigência de personalização [7] [8] [9] [10], pressão sobre custos e prazos [7] [8] [9] [11] e necessidade de integrar simultaneamente objetivos de eficiência, qualidade e sustentabilidade [9] [11] [12]. Apesar da importância reconhecida do MES, o conhecimento disponível permanece fragmentado. Existem estudos que analisam sobretudo arquiteturas tecnológicas e referenciais conceptuais [13] [9] [4], outros que analisam casos industriais específicos [2] e outros que abordam o MES como componente de ecossistemas digitais mais amplos [1] [2] [4], sem explicitar de forma sistemática os mecanismos que ligam a tecnologia aos ganhos em indicadores de desempenho [13] [1] [9] [11] [4]. Revisões sobre MES inteligente [1] [4] e sobre I4.0 [13] [9] [11] [10] reforçam a relevância do tema, mas apontam também para a ausência de sínteses robustas que articulem conceitos, tecnologias e resultados empíricos de forma integrada [13] [1] [9] [11] [4] [10]. Torna-se assim necessária uma revisão sistemática que utilize critérios transparentes de seleção, análise e síntese, e que integre evidência textual explícita sobre implementações de MES em contexto industrial.

1.2. Identificação do problema e relevância industrial

As unidades industriais enfrentam hoje desafios associados à crescente complexidade dos sistemas de fabrico [7] [14] [15] [11], à variabilidade de produtos e volumes [7] [14], a requisitos de rastreabilidade e conformidade regulatória [7] [16] [15] e à necessidade de decisões rápidas com base em dados fiáveis [7] [16] [1]. Estudos na área de sistemas de produção e de operações mostram que a fragmentação entre sistemas de planeamento, sistemas de automação e práticas de melhoria contínua contribui para perdas de eficiência [3] [2] [5] [4], baixa visibilidade operacional [3] [1] [2] [4] e dependência excessiva da experiência individual dos operadores e

gestores [7] [11]. Neste enquadramento, o MES é frequentemente descrito como a camada que faz a ponte entre sistemas de informação empresariais e sistemas de controlo [1] [4] [3] [5], permitindo articular ordens de fabrico, estados de máquina, recursos humanos e fluxos de materiais de forma sincronizada [1] [5] [4] [12]. Trabalhos recentes sugerem que o sistema é determinante para a monitorização de indicadores como a eficiência global do equipamento ou *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), tempos de ciclo, trabalho em curso ou *Work in Process / Work in Progress* (WIP), refugo e desempenho energético [2] [5] [12] [9], possibilitando o fecho do ciclo entre recolha de dados, análise e ação no contexto de iniciativas de melhoria contínua e excelência operacional [2] [11] [4] [12]. A importância deste papel intensifica-se quando o desempenho operacional é analisado em conjunto com objetivos ambientais e métricas associadas a estratégias [9] [11], reforçando a necessidade de sistemas de execução capazes de integrar dados de consumo energético, emissões e desperdícios na gestão diária da produção [9] [11] [17].

1.3. Definição, evolução e contributo do MES para a criação de valor na prática industrial

O MES é descrito na literatura como a camada responsável por monitorizar, coordenar e controlar a execução da produção, assegurando a coerência entre o planeamento e a operação e fornecendo informação fiável sobre o estado real dos processos produtivos [1] [3] [6]. Nesta função, o MES estabelece a ligação entre os níveis de gestão e o chão de fábrica, integrando dados provenientes de equipamentos, operadores e sistemas de automação e suportando a decisão operacional em tempo praticamente real [1] [3]. A evolução do MES acompanha a transição de sistemas predominantemente mecânicos e automatizados para arquiteturas digitais e conectadas, em que a integração entre níveis operacionais e níveis de gestão assume um papel central [6] [5] [2]. No contexto da Indústria 4.0, o MES deixa de ser apenas um sistema de registo local e passa a operar em interação estreita com dispositivos conectados, plataformas em *Cloud* e serviços de análise de dados, isto é, módulos ou aplicações de software que executam automaticamente a análise de dados industriais, que integram dados provenientes de sensores, linhas de produção e CPS [3] [1] [18]. Esta evolução posiciona o MES como plataforma de decisão operacional, articulando monitorização, previsão e recomendação, frequentemente apoiadas por inteligência artificial ou *Artificial Intelligence* (AI), aprendizagem automática ou *Machine Learning* (ML) e DT [2] [18] [19]. Os estudos empíricos mostram que a implementação de MES em diferentes setores industriais se associa a melhorias consistentes na eficácia global do equipamento, redução de tempos de ciclo, diminuição do WIP, aumento da produtividade, melhoria da qualidade e maior flexibilidade face à variabilidade da procura [1] [18] [11] [5]. Em particular, a integração do MES com IoT, BD e *Cloud* viabiliza a recolha contínua de dados e a sua transformação em informação útil para a gestão diária e para a melhoria contínua, reforçando

a visibilidade ponta a ponta e a capacidade de resposta dos sistemas produtivos [3] [1] [2]. A combinação do MES com DT e CPS permite ainda a simulação de cenários e a avaliação antecipada do impacto de decisões de produção, manutenção e mudança operacional de produto, incluindo alterações no mix de produção, na sequenciação e nas trocas de referência na linha, fechando o ciclo entre dados, modelos e execução [2] [3] [1] [18]. Paralelamente, observa-se uma crescente incorporação de métricas energéticas e ambientais no âmbito do MES, permitindo integrar o desempenho energético e a eficiência no processo de decisão operacional [17] [1] [5].

Em síntese, a literatura recente converge na ideia de que o MES evoluiu de sistema centrado no controlo da execução para plataforma central da arquitetura digital das operações industriais. Ao articular a recolha de dados, a transformação em informação operacional, a integração com tecnologias digitais avançadas e a execução da decisão no chão de fábrica, o MES afirma-se como elemento estruturante da I4.0 e como gerador direto de valor operacional, organizacional e energético [3] [6] [1] [2] [18] [5] [11] [19] [17].

1.4. Lacunas na literatura

Embora a literatura apresente um número crescente de trabalhos sobre MES em contexto de Indústria 4.0, subsistem lacunas relevantes. Revisões recentes sobre MES inteligente e sobre o papel do sistema em arquiteturas digitais identificam múltiplas linhas de investigação, mas salientam a falta de sínteses que cruzem de forma sistemática evidência empírica, arquiteturas de referência e funções de decisão [1] [4]. Em paralelo, trabalhos que analisam o panorama global da investigação em I4.0 mostram uma forte expansão de publicações, mas também uma elevada dispersão temática e conceptual, o que dificulta a construção de narrativas integradas sobre tecnologias específicas como o MES [13] [9] [10] [20]. Outra limitação recorrente prende-se com a ausência de ligação explícita entre a descrição das soluções tecnológicas e os impactos quantitativos em indicadores de desempenho [9] [11] [4] [10]. Muitos estudos apresentam arquiteturas e propostas de integração, mas mostram apenas de forma limitada os resultados em termos de OEE, duração total do ciclo produtivo (*lead time*), qualidade ou métricas energéticas [9] [11] [4] [10]. Do mesmo modo, várias publicações documentam melhorias em contexto industrial [11], sem clarificar que componentes do sistema, que mecanismos de informação ou que estratégias de integração explicam os ganhos obtidos [13] [21] [11]. Esta falta de explicitação dos mecanismos dominantes de impacto constitui uma lacuna importante para a engenharia industrial e para a gestão de operações.

1.5. Objetivos do estudo e questões de investigação

O objetivo geral deste estudo é compreender de forma integrada o papel contemporâneo do MES na indústria, analisando a sua evolução ao longo das sucessivas revoluções industriais, as formas de implementação em contexto produtivo e a sua integração com tecnologias digitais e sistemas de produção inteligentes, bem como as principais tendências e direções futuras do seu desenvolvimento enquanto plataforma de decisão operacional. Este objetivo é operacionalizado através de três questões de investigação (QI) que estruturam toda a análise empírica e a discussão crítica dos resultados:

- **QI1.** De que forma o MES evoluiu, desde as primeiras fases de automatização até ao contexto da Indústria 4.0, e como essa evolução redefiniu o seu papel na arquitetura dos sistemas produtivos?
- **QI2.** De que forma o MES é implementado de modo autónomo ou em integração com tecnologias digitais e sistemas de produção inteligentes?
- **QI3.** Quais são as principais tendências e direções futuras de desenvolvimento do MES?

A resposta a estas questões é fundamental para clarificar se o MES assume um papel transitório ou estruturante na arquitetura digital das operações industriais, para compreender de que modo as diferentes configurações de implementação e integração tecnológica se associam a ganhos mensuráveis em indicadores de desempenho como eficácia global do equipamento, *lead time*, qualidade, produtividade e desempenho energético e para identificar as linhas de investigação e de desenvolvimento que irão moldar a sua evolução futura no contexto da I4.0 e da transformação digital das fábricas.

1.6. Estrutura do documento

O documento está organizado em cinco capítulos que seguem uma lógica sequencial alinhada com os objetivos da investigação e com as orientações metodológicas definidas na literatura sobre revisões sistemáticas na gestão de operações.

O Capítulo 1 estabelece o enquadramento conceptual do estudo, identifica o problema de investigação, descreve a relevância industrial do MES e apresenta os objetivos e questões que orientam a análise. Este capítulo integra ainda a justificação para a realização da revisão sistemática e clarifica a contribuição científica pretendida.

O Capítulo 2 apresenta em detalhe a metodologia utilizada, incluindo a estratégia de pesquisa, as bases de dados selecionadas, os critérios de elegibilidade, o processo de triagem e inclusão e os procedimentos adotados para análise bibliométrica e de conteúdo. Este capítulo documenta a aplicação do itens preferenciais para relatar revisões sistemáticas e meta-análises ou *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020)* e

define o corpus final de 109 artigos, assegurando transparência e reprodutibilidade no processo de revisão.

O Capítulo 3 sintetiza os resultados da análise bibliométrica e da análise conceptual, caracterizando a evolução do MES, os principais domínios temáticos, a relação com a I4.0 e a distribuição temporal e setorial da produção científica. Este capítulo identifica ainda as tecnologias digitais mais associadas ao MES e apresenta padrões emergentes que suportam a interpretação dos resultados.

O Capítulo 4 desenvolve a discussão crítica dos resultados com base no corpus de artigos seleccionados, analisando a evolução do MES, os mecanismos dominantes que explicam os impactos observados, as abordagens de implementação mais recorrentes e as tendências tecnológicas que orientam o desenvolvimento futuro do sistema. Este capítulo estabelece ligação direta entre evidência empírica, referenciais conceptuais e práticas industriais, apoiando as respostas às questões de investigação.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais do estudo, sumariza os contributos científicos e práticos, discute limitações metodológicas e sugere direcções futuras de investigação que possam aprofundar o papel do MES na arquitetura digital das operações industriais.

Capítulo 2

Metodologia

O capítulo apresenta a metodologia adotada para a revisão sistemática sobre o MES. A opção pelo *PRISMA 2020* assegura transparência, reprodutibilidade e validade científica do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão de estudos. A pesquisa foi realizada nas bases *Scopus* e *Web of Science* com estratégia booleana e filtros de rigor que garantem a relevância e a qualidade dos resultados. O corpus final integra 109 artigos que sustentam as análises bibliométricas e de conteúdo desenvolvidas nos capítulos seguintes.

2.1. Revisão sistemática com PRISMA 2020

Aplicou-se o *PRISMA 2020* para planejar, executar e reportar a revisão sistemática [22] [23]. O *PRISMA* estrutura o processo de forma clara, com definição prévia do protocolo, critérios de inclusão e exclusão, extração padronizada de dados e reporte integral das decisões. A atualização de 2020 reforça práticas de transparência e incentiva o uso de ferramentas digitais que melhoram a rastreabilidade e a atualização de revisões [22] [23] [24]. O método é amplamente aceite na engenharia e em domínios técnicos por reduzir risco de viés e por facilitar replicação e auditoria científica [23].

A Figura 2.1 O fluxograma da Figura 2.1 apresenta de forma sistemática as etapas e os resultados do processo de seleção dos estudos. Foram inicialmente identificados 596 documentos, sendo 396 provenientes da base de dados *Scopus* e 200 da *Web of Science*. Após a remoção de 138 registos duplicados, obtiveram-se 458 registos únicos para triagem. A leitura de títulos e resumos levou à exclusão de 287 registos. Dos 171 documentos restantes, 27 não apresentavam acesso ao texto integral. Assim, 144 artigos foram avaliados na íntegra, tendo sido excluídos 34 por falta de enquadramento no contexto e aplicação definidos. O corpus final da revisão sistemática integrou, deste modo, 109 estudos.

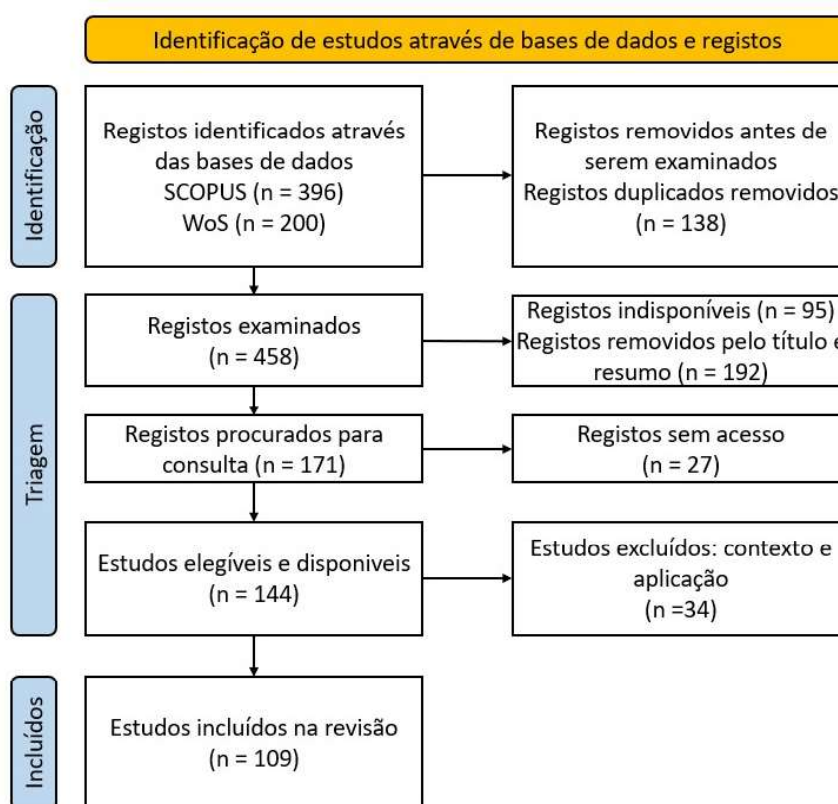


Figura 2.1 - Fluxograma do processo PRISMA 2020 aplicado à revisão sistemática sobre o MES (fonte própria).

2.2. Estratégia de pesquisa e fontes de dados

A pesquisa bibliográfica utilizou a expressão booleana entre aspas “MES” OR “Manufacturing Execution System” AND “industr*”. A utilização conjunta do acrónimo e da designação por extenso teve como objetivo ampliar o alcance da pesquisa e captar estudos que utilizam diferentes formas de designação do Sistema de Execução da Produção. O operador AND associado ao termo “industr*” permitiu concentrar os resultados no contexto industrial, abrangendo variações como industry, industrial ou industries, e excluindo aplicações fora do domínio da engenharia. A utilização conjunta das bases de dados *Scopus* e *Web of Science* procurou mitigar enviesamentos de cobertura associados a plataformas isoladas e aumentar a abrangência temática e geográfica da revisão.

2.3. Critérios de inclusão e exclusão

Definiram-se critérios prévios alinhados com os objetivos do estudo. Foram incluídos apenas artigos de revista com foco explícito no MES em contexto de engenharia, com acesso integral ao texto e descrição metodológica suficientemente detalhada para permitir a identificação das variáveis de interesse. A opção por artigos de revista justifica-se pelo facto de, em regra, estarem sujeitos a processos formais de revisão por pares, apresentarem maior estabilidade de citação e fornecerem informação mais completa sobre o desenho de investigação, o que reforça a fiabilidade e a comparabilidade dos resultados. Excluíram-se publicações de conferência, capítulos de livro e e-books, por apresentarem maior heterogeneidade quanto ao rigor de revisão, ao nível de detalhe metodológico e à estrutura do texto científico [22] [23] [25].

2.4. Processo de triagem e elegibilidade

Os registos exportados das duas bases foram consolidados num ficheiro único em formato de ficheiro de valores separados por vírgulas ou *Comma Separated Values* (CSV). Procedeu-se à deteção e remoção de duplicados com apoio de software estatístico *Bibliometrix*, em ambiente R (versão 4.5.1, The R Foundation for Statistical Computing, 2025), através da interface *Biblioshiny*, assegurando consistência no tratamento dos dados bibliográficos. Realizou-se triagem por título e resumo para eliminar registos que não se enquadravam no tema da investigação. Efetuou-se verificação de acesso integral e leitura dos artigos elegíveis. A decisão final de inclusão baseou-se na pertinência ao objeto de estudo e na qualidade do desenho de investigação, conforme boas práticas de revisões sistemáticas [22] [23] [24].

2.5. Ferramentas e procedimentos analíticos

Os dados bibliométricos foram tratados com *Bibliometrix* e *Biblioshiny* em ambiente R, para análise de produção anual, impacto médio por ano, fontes e autores mais influentes, redes de coocorrência e mapa temático [26] [27] [28]. A análise de conteúdo utilizou codificação estruturada com categorias alinhadas com as variáveis extraídas. A triangulação entre resultados bibliométricos e de conteúdo reforça robustez interpretativa e permite identificar convergências e lacunas do estado da arte.

2.6. Síntese e ligação aos resultados

O protocolo *PRISMA 2020*, isto é, os Itens Preferenciais para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), orientou as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, resultando num conjunto final de 109 artigos que sustenta as análises desenvolvidas no capítulo seguinte. Os resultados bibliométricos e temáticos permitem caracterizar a evolução conceptual e tecnológica do MES e fundamentam a discussão crítica do Capítulo 4, com ligação explícita a indicadores de desempenho e integrações tecnológicas reportadas nos casos industriais [25] [26] [27] [28].

Capítulo 3

Resultados obtidos

O Capítulo 3 apresenta os resultados da revisão sistemática conduzida segundo o método *PRISMA 2020*, com base em 109 artigos, integrando análise bibliométrica e análise de conteúdo. Caracteriza-se o panorama quantitativo da investigação no MES, incluindo evolução das publicações, impacto de citações, fontes, autores, instituições, distribuição geográfica e estrutura temática, com recurso ao *Bibliometrix* e ao *Biblioshiny* em ambiente R. A análise qualitativa organiza os estudos em quatro grupos arquitetura, casos reais, casos industriais e revisões sistemáticas ou bibliométricas, evidenciando os percursos entre conceção e implementação do MES e a sua integração com IoT, BD, serviços *Cloud*, CPS, DT, AI e ML, bem como os impactos em desempenho, energia e sustentabilidade.

3.1. Análise bibliométrica

Os artigos analisados encontram-se sistematizados no Apêndice I, de acordo com a estrutura utilizada na análise da literatura. O Apêndice I corresponde ao Quadro de Análise Técnico-Científica dos artigos sobre MES e integra os seguintes campos: Título, Autores, Ano, Tipo de estudo, Objetivo no estudo, Setor industrial, Papel do MES, Vantagens do MES, Desvantagens do MES, Mecanismos dominantes de impacto, Integração de Tecnologias da Indústria 4.0, Nome das Tecnologias da Indústria 4.0, Resultados e Benefícios do MES, Barreiras e Desafios do MES e Observações. Os dados extraídos foram tratados com o pacote *Bibliometrix* e analisados através do *Biblioshiny* em ambiente R, assegurando rastreabilidade do processo e exploração visual interativa dos resultados. Esta combinação tem-se afirmado como solução abrangente para análise bibliométrica, pela capacidade de processar volumes elevados de informação e de representar relações entre autores, instituições e tópicos de investigação [25] [26] [27] [28]. A escolha deste método mostrou-se adequada ao estudo pela dimensão do corpus e pela necessidade de garantir transparência e replicabilidade. A abordagem permitiu construir um panorama quantitativo e atualizado da investigação no domínio do MES. A análise examinou a produção anual, o impacto médio por ano, as fontes mais relevantes e a sua evolução temporal. Foram igualmente analisados os autores e as instituições com maior representatividade, a distribuição geográfica das publicações e a produção por país. Este estudo identificou ainda os documentos mais citados, as palavras-chave mais recorrentes, os tópicos emergentes de investigação e as redes de coocorrência de termos que estruturam o debate científico atual. O mapa temático obtido sintetiza a maturidade e a interligação dos principais núcleos conceptuais do campo do MES [25] [26] [27] [28]. Os resultados apontam para crescimento consistente do domínio e para maior densidade técnica, com foco na melhoria do desempenho produtivo e na articulação entre sistemas industriais e de gestão. A análise não se limita à quantificação de publicações e procura também captar a evolução conceptual e tecnológica associada ao MES. Em síntese, a leitura integrada fornece uma caracterização sólida do estado da arte, identifica áreas de consolidação e tendências emergentes e evidencia lacunas com potencial para orientar investigações futuras, nomeadamente na integração de dados em tempo quase real e na melhoria dos sistemas produtivos.

3.1.1. Análise da produção científica anual

A evolução temporal dos dados documentados referente ao MES, ilustrada na Figura 3.1, evidencia uma tendência global de aumento da produção científica, marcada por oscilações ao longo do período analisado, o que indica que o interesse acadêmico no MES tem acompanhado, ainda que de forma não linear, a transformação digital da indústria, refletindo a sua crescente relevância como ferramenta de suporte à tomada de decisão e à eficiência produtiva.

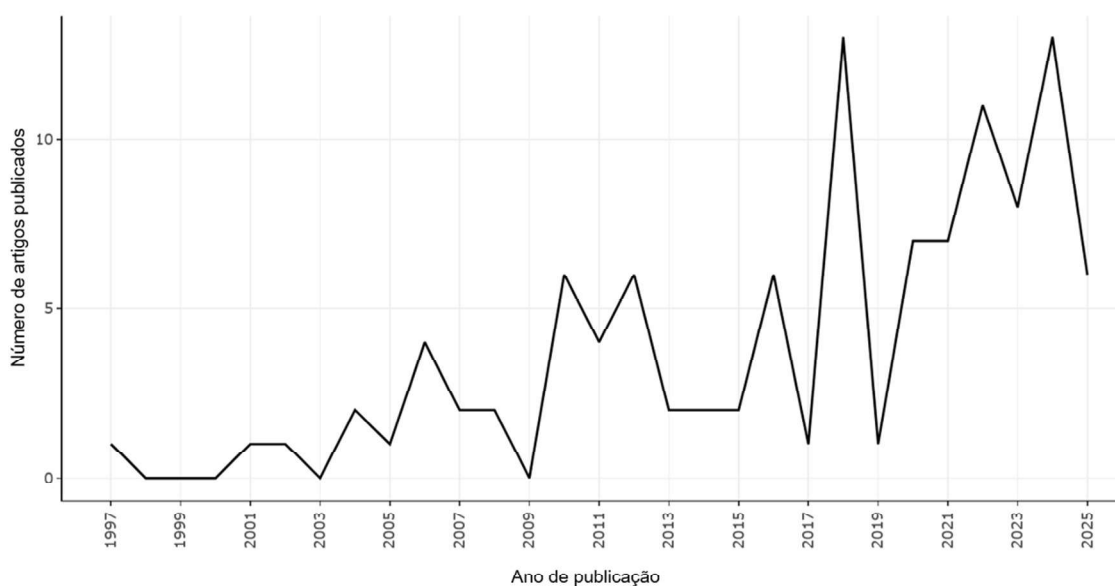


Figura 3.1 - Produção científica anual (extraído do software *Biblioshiny*).

Entre 1997 e 2005, observa-se uma atividade científica embrionária, com valores reduzidos e irregulares de publicações anuais, o que reflete uma fase inicial de consolidação conceptual do MES. Esta fase inicial pode ser associada à ausência de normalização de sistemas e à limitada adoção de soluções digitais nas cadeias produtivas à época.

A partir de 2010, verifica-se uma tendência ascendente mais consistente, marcada por uma intensificação das publicações, acompanhando a crescente digitalização das operações industriais e a adoção de sistemas integrados de gestão. Este aumento torna-se particularmente evidente a partir de 2016, culminando num pico de produção em 2018, com 13 artigos publicados. O aumento registado a partir de 2016 pode estar relacionado com a disseminação do paradigma da Indústria 4.0, que reforçou o papel do MES como elo entre o chão de fábrica e os sistemas empresariais de planeamento.

Entre 2019 e 2025, mantém-se um nível elevado e estável de publicações, oscilando entre 7 e 13 artigos anuais. Esta estabilidade sugere a consolidação do MES como tema central nas investigações sobre transformação digital e eficiência produtiva, refletindo o interesse contínuo da comunidade científica e industrial. Esta consistência mostra que o MES deixou de ser um

tema emergente para se tornar uma área consolidada, com contributos regulares e especializados. Ainda que se observe uma ligeira redução no número de artigos em 2025, tal variação é expectável, uma vez que o ano em curso poderá ainda não ter o registo completo de publicações. De forma global, os resultados obtidos apontam que a investigação sobre o MES evoluiu de uma fase exploratória para um domínio consolidado, com volume crescente de produção científica e maior especialização temática.

3.1.2. Evolução das citações médias por ano

A Figura 3.2, apresenta a evolução das citações médias por ano, possibilitando avaliar a visibilidade e o impacto científico dos artigos publicados sobre o MES entre 1997 e 2025. O gráfico revela variações significativas ao longo do período analisado, observando-se oscilações na relevância e na difusão dos trabalhos nesta área.

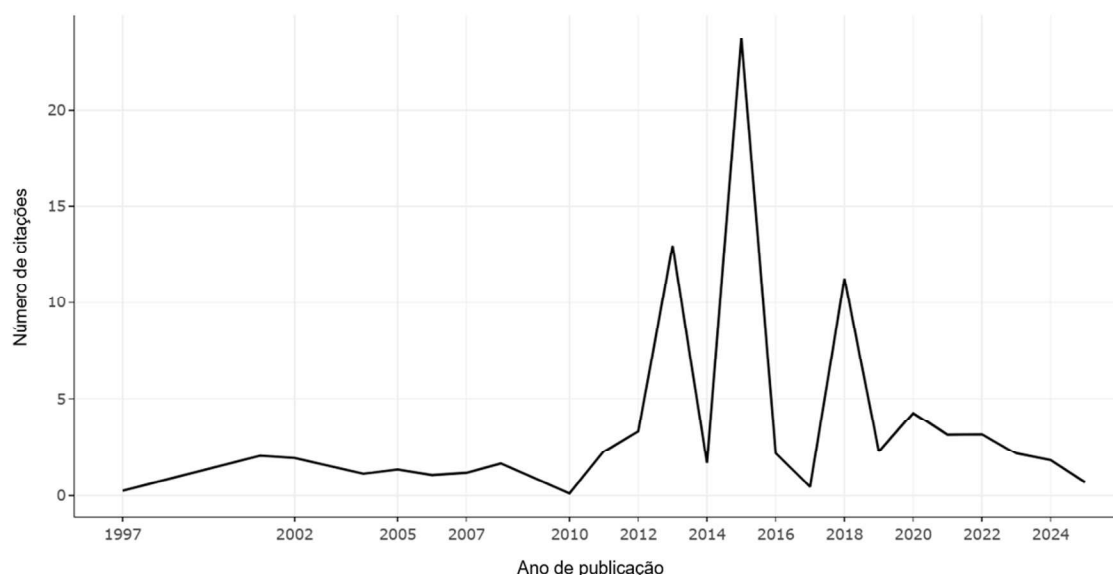


Figura 3.2 - Citações médias por ano (extraído do *software Biblioshiny*).

Entre 1997 e 2010, os valores médios de citação por artigo mantêm-se baixos, permanecendo geralmente abaixo das 5 citações anuais. Este comportamento é típico de fases iniciais de desenvolvimento científico, em que os estudos ainda são escassos e o campo carece de consolidação teórica e empírica. Esta reduzida taxa de citação poderá estar associada à limitada disseminação internacional dos primeiros trabalhos sobre MES e à ausência de um enquadramento normativo comum. A partir de 2012, observa-se uma tendência de crescimento, atingindo o seu pico máximo em 2015, com cerca de 24 citações anuais por artigo. Este aumento reflete o reconhecimento e maturidade científica alcançados por determinados estudos de referência, que terão servido de base para trabalhos subsequentes. Este pico pode estar

relacionado com a publicação de artigos-chave, frequentemente citados, que consolidaram a relevância do MES no contexto da I4.0 e da digitalização dos processos produtivos. Após 2015, regista-se uma diminuição gradual no número médio de citações, com variações pontuais até 2020. Este comportamento não traduz necessariamente uma redução do interesse científico, sendo coerente com o efeito temporal típico das citações, segundo o qual os artigos mais recentes apresentam, em média, valores inferiores de citação por ainda se encontrarem numa fase inicial do seu percurso de difusão científica e integração na literatura existente. É expectável que esta tendência descendente esteja relacionada com a diversificação dos temas de investigação, uma vez que o estudo do MES se tem repartido por áreas mais específicas, levando a uma dispersão das citações entre diferentes subtemas. No período entre 2020 e 2025, a média de citações estabiliza em valores moderados, situando-se entre 2 e 5 citações anuais, o que sugere manutenção de interesse científico, embora com menor intensidade relativamente aos anos de maior impacto. De forma global, o padrão observado indica que a influência científica dos estudos sobre MES atingiu o seu auge entre 2013 e 2016, coincidindo com a consolidação do conceito de fábricas inteligentes e sistemas integrados de gestão da produção. Esta análise confirma que, o impacto científico do MES se estabilizou, sinalizando uma fase de consolidação da investigação.

3.1.3. Fontes científicas mais relevantes

A Figura 3.3, mostra as principais fontes científicas responsáveis pela publicação dos artigos incluídos na revisão sistemática MES, onde ilustra o número de documentos por revista, permitindo identificar os periódicos com maior contributo para a partilha do conhecimento nesta área. As revistas *Applied Sciences-Basel* e *Computers in Industry* destacam-se como as mais produtivas, com 7 publicações cada, seguidas pelo *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, com 5 publicações. Outras fontes relevantes incluem o *Journal of Manufacturing Systems* e o *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, ambos com 4 publicações, o que reflete o seu posicionamento editorial consolidado no domínio da integração de sistemas de produção, da automação industrial e das arquiteturas digitais de fabrico, áreas nucleares da investigação sobre o MES. Esta predominância de revistas focadas na automação e nos sistemas inteligentes evidencia a natureza tecnológica aplicada ao desenvolvimento do MES, que se situa na confluência entre engenharia industrial, informática e gestão da produção. Revistas como *Automation and Remote Control*, *IEEE Access*, *International Journal of Production Research* e *Journal of Intelligent Manufacturing* apresentam 3 publicações cada, mostrando uma distribuição equilibrada do interesse científico por diferentes domínios da engenharia e da computação. Já a *Acta Polytechnica Hungarica* regista 2 publicações, refletindo a participação de instituições europeias em projetos de investigação sobre MES. A diversidade de fontes confirma o carácter multidisciplinar do tema, envolvendo abordagens provenientes da engenharia de produção, das tecnologias de informação e da investigação operacional. De forma global, os

resultados apresentam que a investigação sobre o MES é publicada em bases de dados de referência no panorama internacional, abrangendo áreas como automação industrial, integração computacional, sistemas inteligentes e otimização produtiva. Este padrão de publicação reforça a importância do MES como tema transversal à transformação digital e à Indústria 4.0, com forte penetração em revistas de engenharia aplicada e de inovação tecnológica.

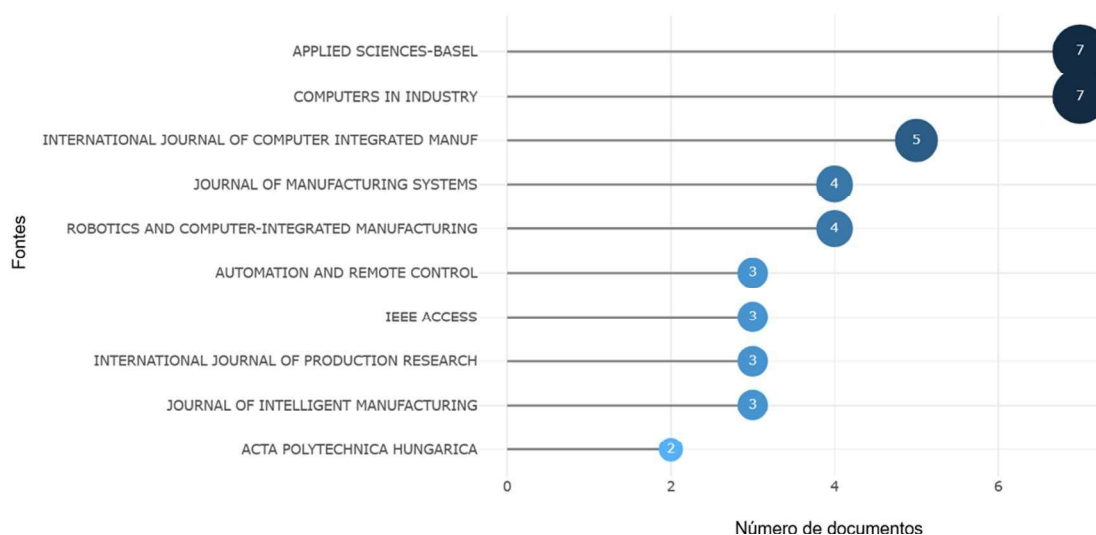


Figura 3.3 - Fontes científicas mais relevantes (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.4. Evolução temporal das fontes científicas

A seguinte Figura 3.4, mostra a evolução temporal da produção científica das principais revistas que mais contribuíram para a partilha de estudos referentes ao MES. Verifica-se a acumulação de publicações ao longo do tempo, permitindo identificar o período em que cada fonte iniciou e intensificou a sua atividade neste domínio. É possível verificar que as revistas *Computers in Industry* e *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* começaram a publicar artigos sobre o tema entre 2003 e 2011, refletindo o interesse inicial da comunidade científica pela digitalização dos processos produtivos e pela integração de sistemas de fabrico. Este período corresponde à fase de consolidação do conceito de MES e ao desenvolvimento das primeiras normas internacionais de integração, que criou um enquadramento metodológico comum. A partir de 2016, observa-se uma aceleração da produção científica sobre o MES, evidenciada pelo surgimento e crescimento simultâneo de publicações acumuladas em novas revistas de referência, designadamente o *Journal of Manufacturing Systems* e o *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, às quais se junta, mais recentemente, a *Applied Sciences-Basel*, refletindo a expansão editorial do domínio. Estas 3 fontes evidenciam um aumento notório no número acumulado de artigos a partir de 2019, em que se verifica um interesse crescente no estudo do MES em contextos de automação e I4.0. O aumento verificado neste período pode ser associado à difusão do paradigma da I4.0 e à adoção do MES como elemento central na

integração entre o planeamento e a execução da produção. A análise cumulativa revela também que *Applied Sciences-Basel* e *Computers in Industry* são atualmente as revistas com maior crescimento contínuo, ultrapassando 6 publicações cada, o que mostra a sua relevância e atualidade no campo da engenharia industrial e dos sistemas inteligentes de fabrico. De forma geral, a evolução temporal das fontes científicas mostra que a investigação sobre o MES evoluiu de um foco inicial centrado no fabrico e no controlo da produção para uma abordagem progressivamente mais multidisciplinar, que integra temas de automação, sistemas ciber-físicos e tecnologias inteligentes, como evidenciado pela diversificação das revistas que passaram a acolher esta temática. Esta expansão temática reforça que o MES se tornou um eixo estruturante da investigação, com contributos consistentes e diversificados ao longo do tempo.

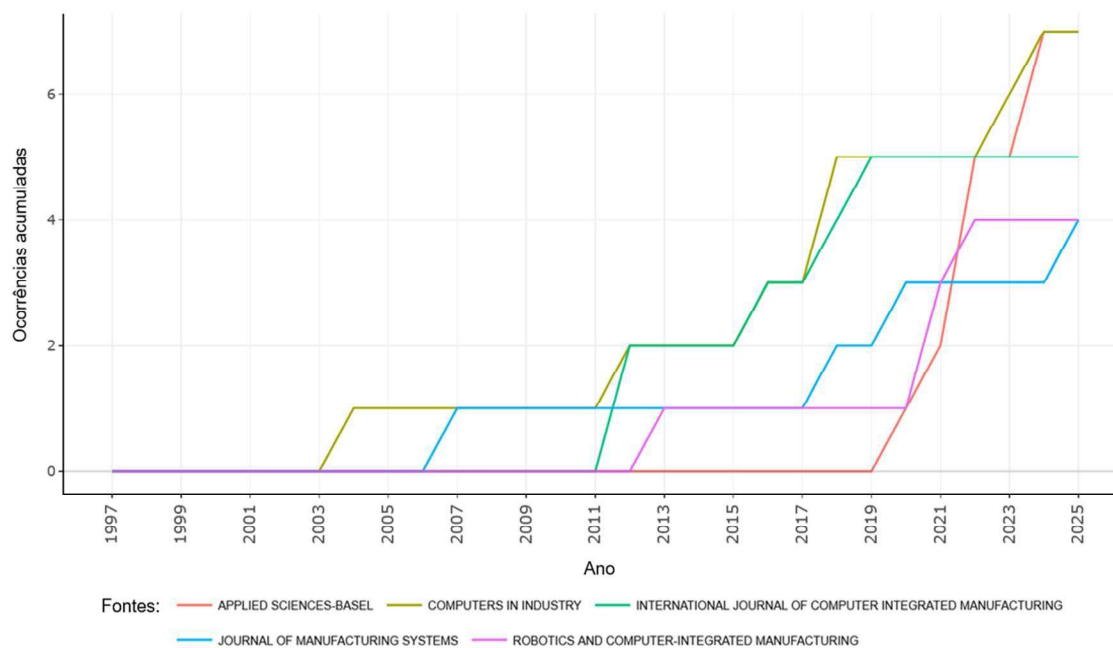


Figura 3.4 - Evolução temporal das fontes científicas (extraído do software *Biblioshiny*).

3.1.5. Autores mais relevantes

Com base na amostra de 109 artigos analisados, a Figura 3.5, apresenta os 10 autores mais influentes na área de estudo do MES. O número de publicações por autor, permite identificar os principais contribuintes científicos para o avanço da investigação neste domínio. Destacam-se os autores Huang, Li e Wang, cada um com 7 publicações, seguidos de Chen, com 5, e os restantes investigadores Dai, Dobra, Kim, Lee, Liu e Qu, com 4 publicações cada. Esta concentração de autores indica a existência de um núcleo restrito de investigadores com elevada produtividade, responsáveis por impulsionar o desenvolvimento e a consolidação do conhecimento sobre o MES. A influência destes autores, maioritariamente de origem asiática, declara que a investigação sobre o MES tem sido fortemente liderada por instituições e centros

de investigação situados na Ásia, particularmente na China e na Coreia do Sul. Este padrão regional pode estar relacionado à forte aposta industrial e tecnológica destes países em soluções de automação e fabrico inteligente, áreas em que o MES assume um papel central. A presença de autores com 4 ou 5 publicações indica uma base colaborativa sólida e estável, evidência a consolidação de uma estabilidade de autores recorrentes contribui para a continuidade das linhas de investigação, bem como as boas práticas metodológicas no estudo do MES. De forma global, a análise dos autores mais relevantes apresenta um padrão de liderança científica consolidada, concentrada em poucos investigadores com publicações regulares e influentes, que têm contribuído para a consolidação como área de investigação.

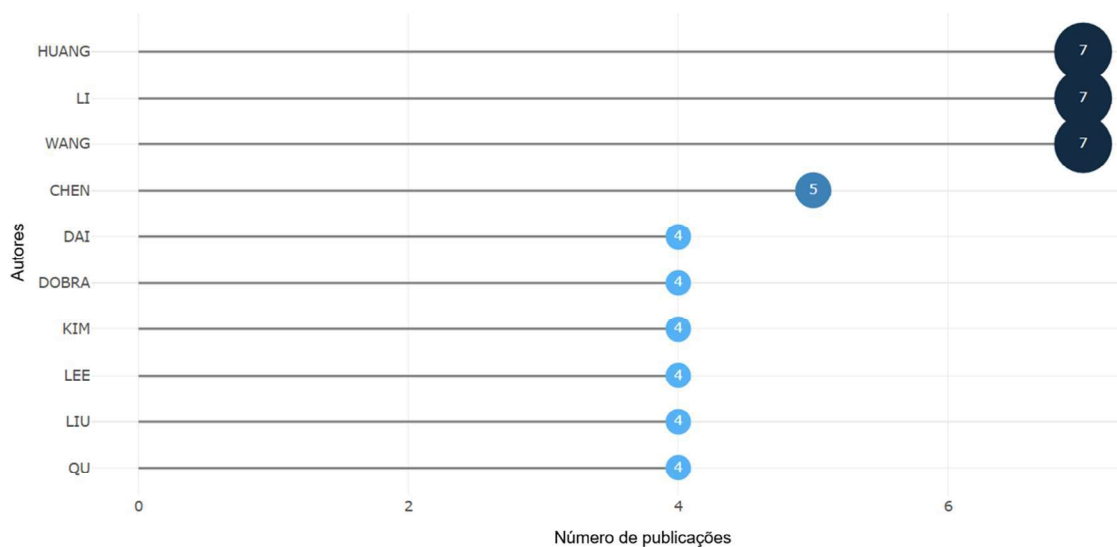


Figura 3.5 - Autores mais relevantes (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.6. Instituições mais relevantes

A Figura 3.6 identifica as 10 universidades e centros de investigação que mais têm contribuído para a produção científica sobre domínio MES. A *Chalmers University of Technology*, (Suécia), lidera com 10 publicações, seguida das universidades de *Guangdong University of Technology* (China), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil) e pela *University of István Széchenyi* (Hungria), cada uma com 6 artigos publicados. Esta distribuição mostra um equilíbrio geográfico entre instituições europeias, asiáticas e sul-americanas, refletindo a dimensão global da investigação sobre o MES e a sua aplicação em diferentes contextos industriais. Outras instituições com destaque incluem a *Aalborg University* (Dinamarca), a *Jinan University* (China), a *University Politehnica of Bucharest* (Roménia), todas com 5 publicações, bem como a *Instituto de Desarrollo y Diseño* (Argentina), e a *Kumoh National University of Technology* (Coreia do Sul), com a publicação de 4 artigos. A presença de múltiplos países europeus e asiáticos entre as principais instituições enaltece a natureza colaborativa e transnacional da investigação sobre

MES, incitada pelo avanço da I4.0 e pela necessidade de integração global de sistemas produtivos. A diversidade de instituições e regiões sugere que o MES é um tema de relevância internacional, abrangendo investigações conduzidas em ambientes acadêmicos e industriais distintos, com abordagens tanto teóricas como aplicadas.

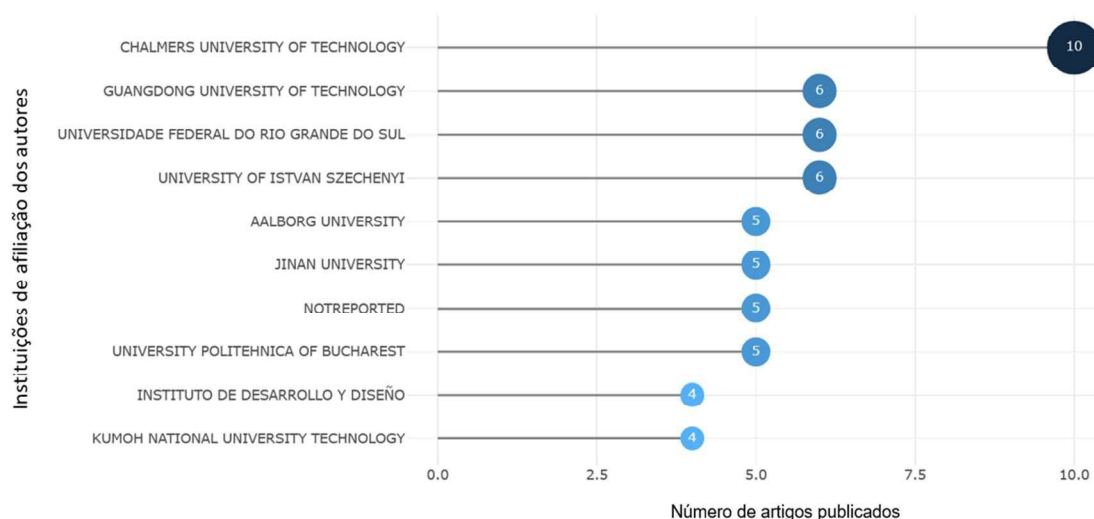


Figura 3.6 - Instituições mais relevantes (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.7. Distribuição geográfica das publicações

A Figura 3.7 elenca a distribuição geográfica das publicações científicas, de acordo com o país de afiliação do autor correspondente. Este gráfico permite avaliar o peso relativo de cada nação na produção científica e a intensidade da cooperação internacional no domínio em análise. A China surge como o país mais produtivo, com 14 publicações, seguem-se a Alemanha, Hungria e Coreia do Sul, com 5 publicações cada. Em posição intermédia encontra-se o Brasil, com 4 publicações, e seguidamente a Dinamarca e Itália, com 3 publicações, evidenciando a presença equilibrada de diferentes regiões do globo. A posição dominante da China reflete a prioridade dada à automação e digitalização industrial, apoiada por programas nacionais de inovação tecnológica e políticas orientadas para a Indústria 4.0. O Brasil apresenta 4 publicações, das quais metade resultam de colaborações internacionais, tal como a Dinamarca, com 3 artigos e um elevado grau de cooperação internacional. Estes valores espelham que países com economias emergentes ou de menor dimensão científica beneficiam fortemente de parcerias internacionais para o avanço da investigação. Países europeus como Itália, Finlândia, França e Polónia contribuem com entre duas e 3 publicações, algumas em regime de coautoria internacional, reforçando o perfil colaborativo da investigação europeia. Países com menor expressão quantitativa, como EUA, Roménia, Irlanda, Países Baixos, Portugal e Malásia, apresentam uma presença pontual, mas confirmam a abrangência internacional do interesse científico pelo tema. A análise global confirma que a investigação sobre MES é dominada por

países tecnologicamente avançados, mas apresenta também uma crescente diversificação geográfica, refletindo o carácter transversal e internacional desta área de estudo.

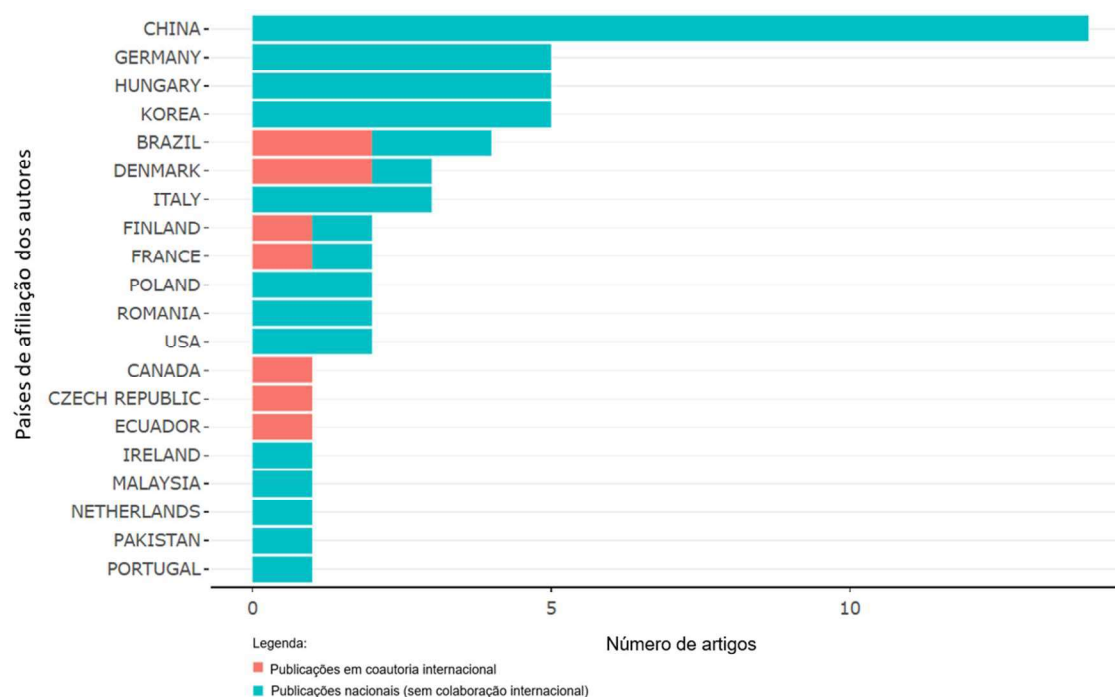


Figura 3.7 - Distribuição geográfica das publicações científicas (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.8. Produção científica por país

Na Figura 3.8 verifica-se a distribuição global das publicações, em que a intensidade de cor representa o número de artigos por país. Os resultados evidenciam uma forte concentração na Ásia e na Europa, que constituem os principais polos de produção científica nesta área. A China lidera expressivamente com 44 publicações, seguida de 14 publicações por parte da Coreia do Sul, Brasil e França 11 publicações, e Alemanha e Hungria com 10 publicações cada. Estes países configuram os centros mais ativos de investigação em automação industrial e integração de sistemas produtivos. Este destaque asiático e europeu confirma a centralidade do MES nas estratégias nacionais de transformação digital, refletindo o investimento em investigação aplicada e a integração entre universidades e indústria. A Europa Central e do Norte apresenta igualmente elevada representatividade, com países como Polónia, Itália, Dinamarca e Países Baixos a contribuírem para uma produção científica diversificada. O Brasil destaca-se na América Latina, enquanto Malásia, Roménia e Portugal mostram uma afirmação progressiva científica no tema. Desta forma, a investigação sobre o MES encontra-se consolidada em economias industrializadas, mas em expansão gradual para regiões emergentes, o que reforça o seu carácter internacional e interdisciplinar no contexto da I4.0.

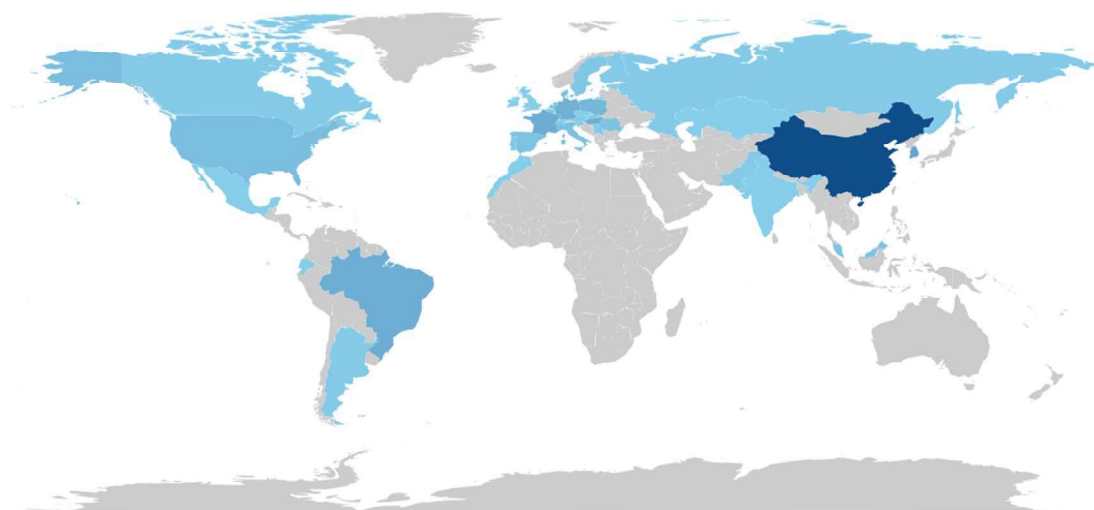


Figura 3.8 - Produção científica por país (extraído do software *Biblioshiny*).

3.1.9. Países mais citados

Observa-se pela Figura 3.9, os países cujas publicações obtiveram maior número de citações, refletindo o impacto e a relevância científica das respetivas produções. A França realça-se com 751 citações, seguida da China com 653 e dos Estados Unidos da América 186. A Itália, Dinamarca e Alemanha registam valores intermédios que variam entre 75 e 117 citações, enquanto países como Espanha, Roménia, Coreia do Sul e Brasil apresentam menor influência, com menos de 60 citações. A expressividade francesa e chinesa mostra não apenas elevada produtividade, mas também forte reconhecimento científico, associado a redes consolidadas de colaboração e a projetos de investigação internacional. A presença significativa de países europeus entre os mais citados confirma a relevância do continente no estudo do MES, sustentada por políticas de inovação industrial e tecnológica. De forma geral, denota-se que o impacto científico do MES se encontra concentrado em regiões com maior capacidade tecnológica, reforçando o seu papel estratégico na transformação digital e na I4.0.

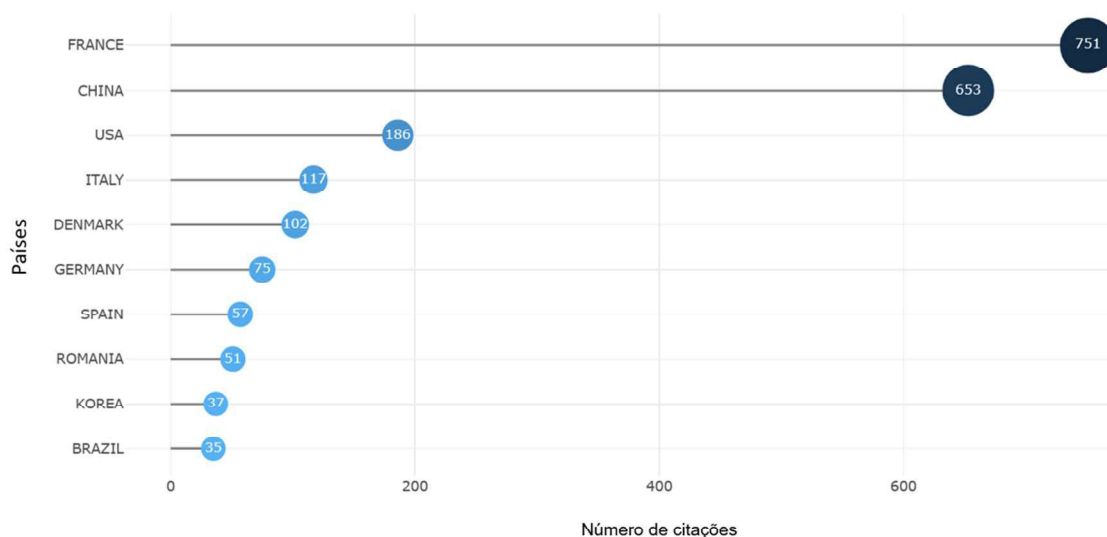


Figura 3.9 - Países mais citados (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.10. Documentos mais citados globalmente

Analisando a Figura 3.10, aprecia-se os artigos com maior número de citações na amostra analisada, permitindo identificar os trabalhos de referência no estudo do MES e temas correlacionados. O artigo de Moeuf et al. (2018), publicado no *International Journal of Production Research*, precede com 696 citações, seguido por Almada-Lobo (2015), no *Journal of Innovation Management*, com 522 citações, e por Zhong et al. (2013), no *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, com 335 citações. Outros estudos de destaque incluem, Coronado et al. (2018), com 186 citações e Negri et al. (2020) com 111 citações. Os artigos mais referenciados assumem um papel central na consolidação teórica do MES, explorando a integração entre sistemas ciber-físicos, fabrico inteligente e a digitalização progressiva dos processos produtivos, pilares fundamentais da Indústria 4.0. Estudos de autores como Rolón (2012), Dai (2012) e Fernandez-Caramés (2018), embora com um número mais reduzido de citações entre 50 e 90, continuam a contribuir significativamente para o desenvolvimento de modelos de otimização e integração de sistemas de fabrico. De forma abrangente, a análise das citações revela que o impacto científico nesta área está associado à capacidade de articular o MES com tecnologias emergentes, reforçando a sua importância estratégica na transição digital das operações industriais.

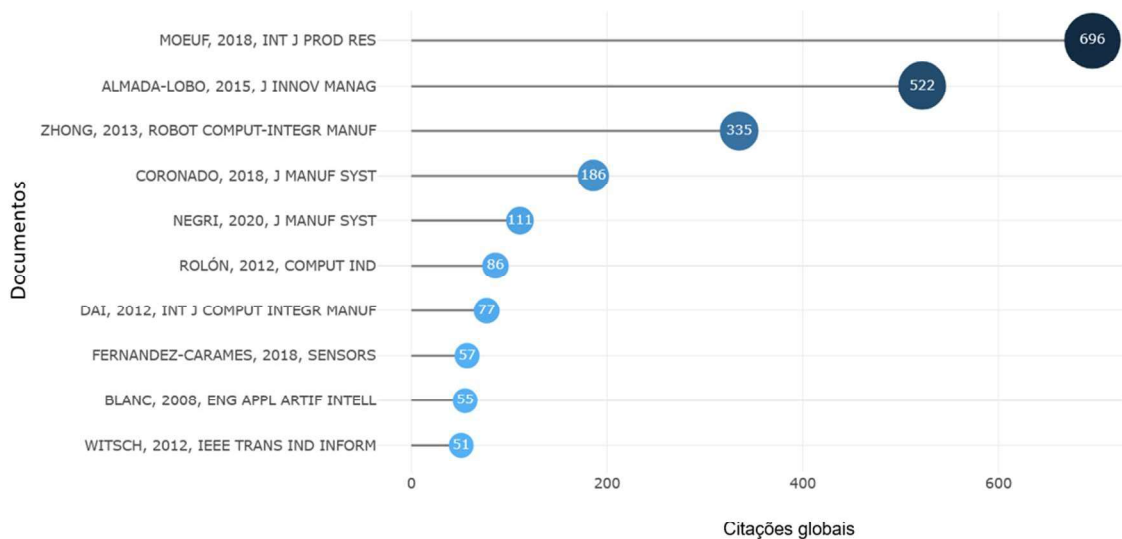


Figura 3.10 - Documentos mais citados globalmente (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.11. Palavras-chave dos autores

É sintetizado os conceitos mais recorrentes nas publicações analisadas, permitindo identificar os eixos temáticos predominantes na investigação, conforme ilustra a Figura 3.11. As palavras-chave com maior dimensão representam maior frequência de ocorrência no conjunto dos artigos analisados, uma vez que o tamanho relativo de cada termo é proporcional ao número de registos em que ocorre. Termos como “smart manufacturing”, “enterprise resource planning”, “manufacture”, “production control”, “automation” e “digital twin” surgem como os mais destacados, o que evidencia a centralidade das tecnologias digitais, da integração entre sistemas empresariais e de produção e do apoio à decisão no contexto do fabrico inteligente. A recorrência destes conceitos revela uma convergência metodológica entre o MES e as tecnologias facilitadoras da I4.0, nas quais a automatização, a interconectividade e os DT assumem papel determinante na evolução dos sistemas de fabrico inteligentes. Outras expressões com relevância significativa incluem “*industrial management*”, “*data acquisition*”, “*interoperability*” e “*cyber-physical systems*”, as quais reforçam o enfoque técnico-organizacional da investigação e a importância da recolha, tratamento e integração de dados em tempo real. Em suma, o padrão de ocorrência das palavras-chave mostra a evolução do MES de um sistema operacional isolado para um componente central de ecossistemas produtivos inteligentes, apoiados em tecnologias de dados, conectividade e otimização contínua.

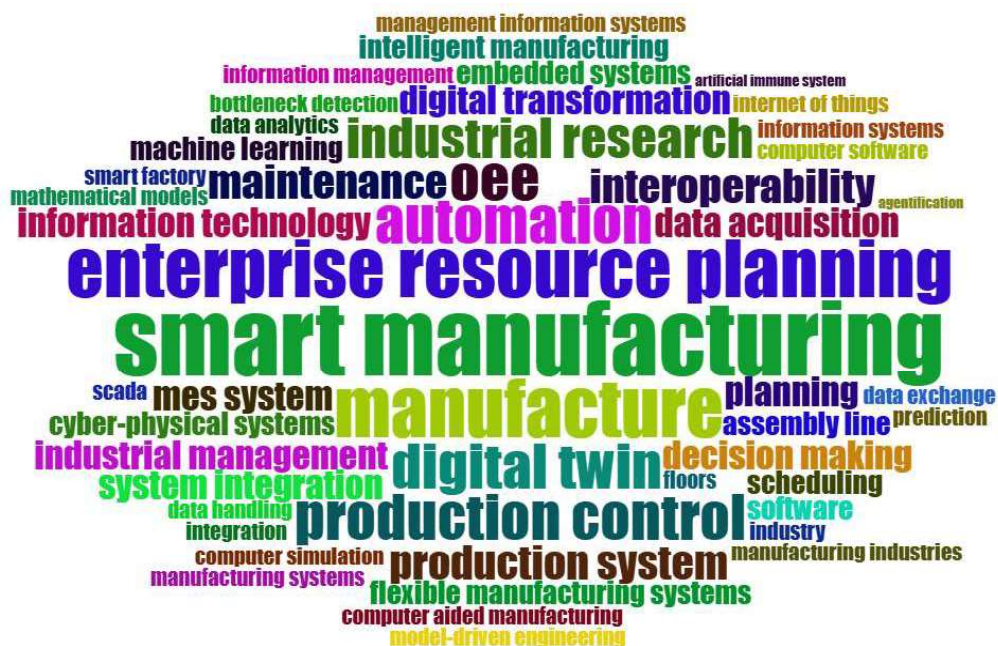


Figura 3.11 - Nuvem de palavras-chave dos autores (extraído do software Biblioshiny).

3.1.12. Tópicos Emergentes de Investigação

A Figura 3.12 apresenta a distribuição cronológica dos principais tópicos de investigação relacionados com o MES. Verifica-se que os primeiros termos recorrentes, entre 2005 e 2012, incluem “*industrial management*”, “*information technology*” e “*enterprise resource planning*”, refletindo uma fase inicial de enquadramento do MES em sistemas empresariais e de planeamento de recursos. A partir de 2015, observa-se uma clara diversificação temática, evidenciada pela emergência de palavras-chave como “*automation*”, “*production control*” e “*data acquisition*”, cujo surgimento temporal indica um deslocamento da investigação para abordagens mais tecnológicas e orientadas à operação. Nos anos mais recentes, entre 2018 e 2024, passam a emergir termos como “*smart manufacturing*”, “*digital twin*”, “*digital transformation*” e “*interoperability*”, refletindo a adoção progressiva dos conceitos da I4.0. Esta evolução temporal das palavras-chave demonstra que a investigação sobre o MES transitou de uma perspetiva predominantemente centrada na gestão e no planeamento para um enfoque cada vez mais digital, suportado na integração de tecnologias inteligentes e na interligação entre sistemas físicos e virtuais. Em síntese, o gráfico evidencia uma progressiva sofisticação temática e um alinhamento consistente com as transformações digitais dos sistemas produtivos atuais.

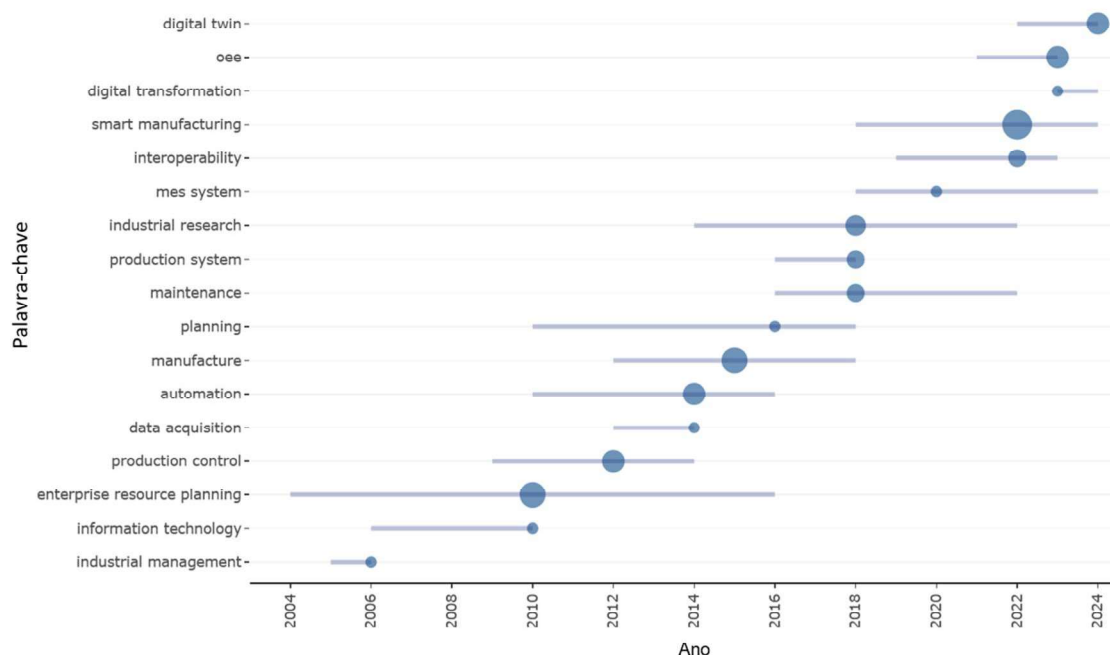


Figura 3.12 - Evolução temporal dos principais tópicos de investigação (extraído do *software Biblioshiny*).

3.1.13. Rede de Coocorrência de Termos

A rede de coocorrência das palavras-chave mais utilizadas nos artigos analisados, conforme Figura 3.13, foi obtida a partir do campo *Author's keywords* no *Biblioshiny*. O tamanho dos nós, representa a frequência de ocorrência dos termos, enquanto as ligações e as cores evidenciam a intensidade das associações e os diferentes agrupamentos temáticos. Observa-se a existência de vários *clusters*, com destaque para os termos “*smart manufacturing*”, “*enterprise resource planning*”, “*manufacture*”, “*production control*” e “*industrial management*”, que se posicionam como núcleos centrais da rede. Esta configuração revela uma estrutura de investigação diversificada, mas fortemente interligada, centrada na digitalização e na integração de sistemas produtivos. O predomínio relativo de termos como “*smart manufacturing*” e “*enterprise resource planning*” é indicativo de uma orientação significativa da literatura para a integração vertical e horizontal dos processos de fabrico, compatível com os princípios da I4.0. A proximidade entre conceitos como “*automation*”, “*data acquisition*”, “*digital twin*” e “*machine learning*” sugere ainda a crescente incorporação de tecnologias digitais e de analítica avançada no âmbito do MES, reforçando a sua função como elo entre o planeamento estratégico e a execução operacional. A presença de *clusters* de menor dimensão, associados a termos como “*cyber-physical systems*”, “*interoperability*” e “*embedded systems*”, indica a emergência de subáreas mais especializadas, orientadas para desafios técnicos e de integração sistémica. Este padrão reflete o amadurecimento científico do domínio e a sua diferenciação temática. Em síntese, a rede de coocorrência mostra que o MES é abordado sobretudo no contexto da transformação digital e da convergência tecnológica, integrando perspectivas de gestão industrial e de engenharia de sistemas, o que evidencia o seu carácter interdisciplinar e estratégico.

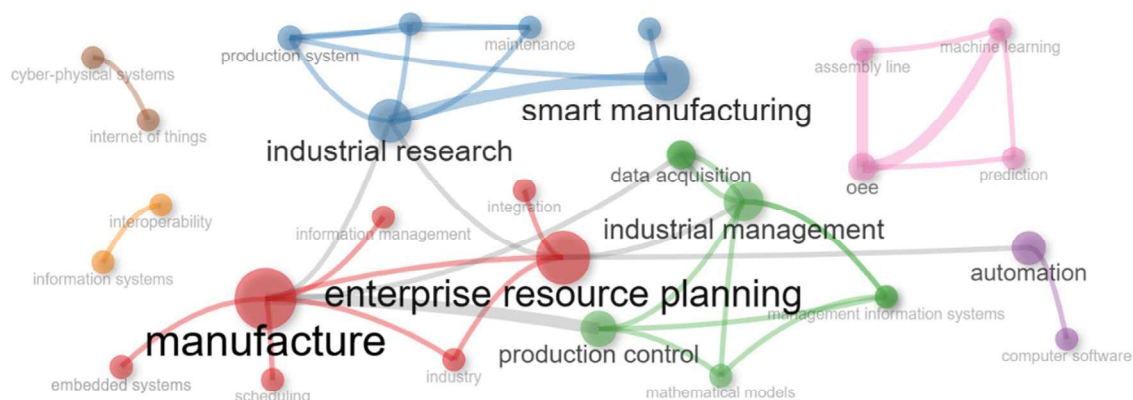


Figura 3.13 - Rede de coocorrência de palavras-chave (extraído do software *Biblioshiny*).

3.1.14. Mapa Temático

É apresentada a estrutura temática da investigação, conforme a Figura 3.14, onde está organizada segundo o grau de relevância e o grau de desenvolvimento de cada tema. Subsequente, as delimitações circulares representam agrupamentos de palavras-chave, cujo tamanho é proporcional à sua frequência de ocorrência. Cada quadrante declara os temas Motores, básicos, de nicho e Emergentes/Declinantes, à qual fazem parte da interpretação padrão dos mapas temáticos gerados pelo *Biblioshiny* / *Bibliometrix*. Eles classificam os grupos de palavras-chave segundo duas dimensões:

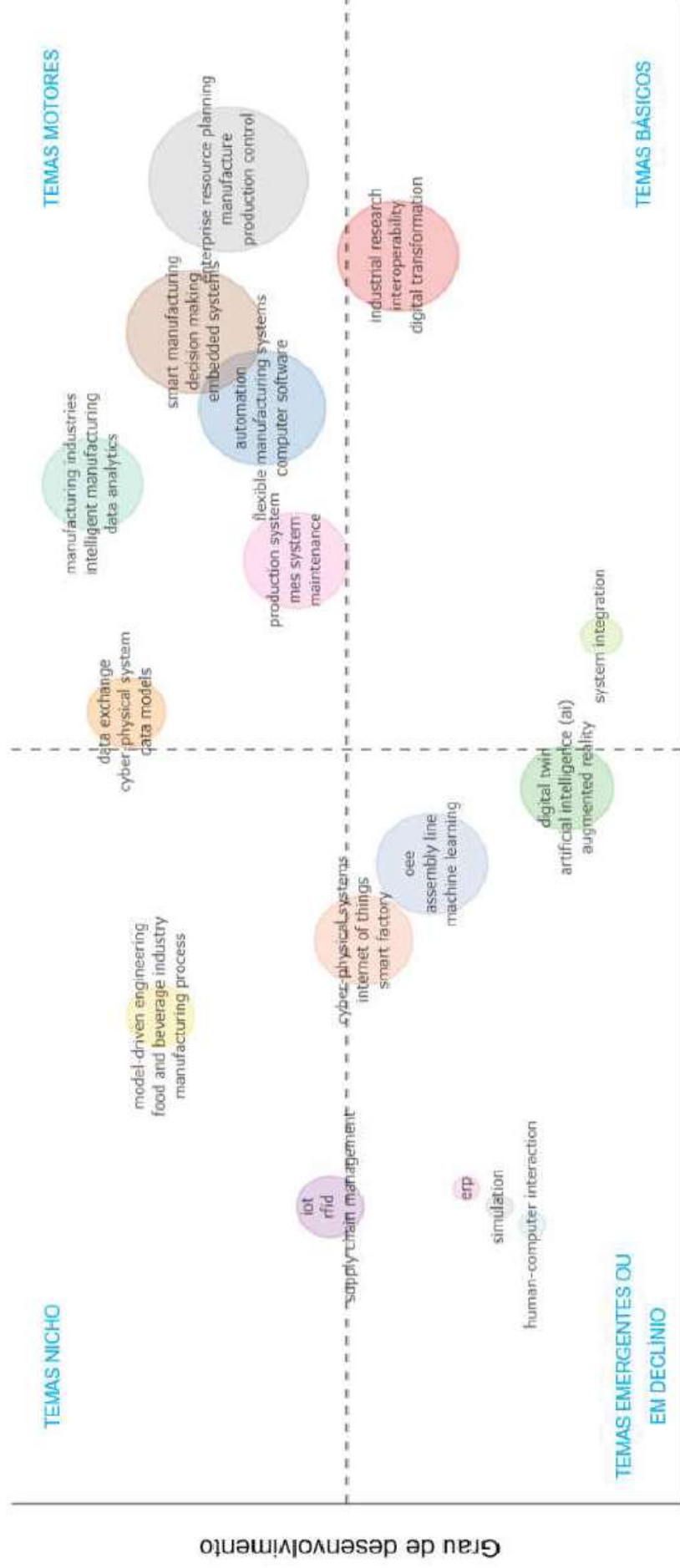
- Eixo X, que indica o grau de relevância que mede a importância de um tema em relação aos outros (quanto mais à direita, mais central na área científica).
- Eixo Y, aborda o grau de desenvolvimento, e mede o nível de maturidade ou desenvolvimento interno do tema (quanto mais acima, mais desenvolvido e coerente).

Com base nestas duas variáveis, formam-se 4 quadrantes, conforme Tabela 3.1, que mostra a interpretação de cada quadrante:

Tabela 3.1 - Interpretação dos quadrantes do mapa temático

Quadrante	Significado	Explicação prática
Temas Motores (superior direito)	Temas centrais e maduros	São altamente desenvolvidos e fortemente ligados a outras áreas. No caso do MES, indicam núcleos de investigação consolidados e aplicáveis, como “ <i>smart manufacturing</i> ” ou “ <i>enterprise resource planning</i> ”.
Temas Básicos (inferior direito)	Temas essenciais, mas ainda pouco desenvolvidos	Servem de base teórica e sustentam outras linhas de investigação, mas ainda carecem de aprofundamento.
Temas de Nicho (superior esquerdo)	Temas muito especializados, mas pouco conectados ao resto do campo	São tópicos técnicos ou contextuais, estudados por grupos restritos.
Temas Emergentes ou em Declínio (inferior esquerdo)	Temas pouco desenvolvidos e de baixa relevância atual	Podem estar a surgir (em fase inicial) ou a perder relevância (em declínio).

Mapa temático



Grau de relevância

Figura 3.14 - Mapa temático das palavras-chave (extraído do software Biblioshiny).

No que respeita ao quadrante dos temas motores, localizam-se tópicos centrais e consolidados, como “*smart manufacturing*”, “*enterprise resource planning*”, “*automation*” e “*production control*”, que constituem o núcleo da produção científica atual sobre MES, com elevada aplicabilidade industrial. Os temas básicos, no quadrante inferior direito, incluem “*industrial research*”, “*interoperability*” e “*digital transformation*”, funcionando como fundamentos conceptuais que sustentam a evolução teórica e metodológica do domínio. No quadrante superior esquerdo, situa-se os temas de nicho como “*model-driven engineering*” e “*manufacturing process*”, que correspondem a subáreas altamente especializadas, de desenvolvimento limitado, mas com potencial de aplicação futura. Por sua vez, os temas emergentes ou em declínio, como ERP, “*simulation*” e “*human-computer interaction*”, revelam tópicos em fase inicial de investigação ou de relevância decrescente, refletindo dinâmicas de renovação e transição no campo científico.

Globalmente, o mapa indica que a investigação em MES se encontra tecnologicamente consolidada e metodologicamente diversificada, com temas consolidados que se articulam fortemente com a digitalização industrial e a integração de sistemas inteligentes. Simultaneamente, observa-se o surgimento de subdomínios emergentes ligados à automação inteligente e à interoperabilidade, que poderão definir as futuras orientações do campo científico.

3.2. Análise de conteúdo

A revisão dos 109 estudos mostra uma sequência de maturação consistente do MES. Os trabalhos de Arquitetura estabelecem a base conceptual e tecnológica, definem um modelo semântico comum, clarificam a sincronização entre planeamento e execução e mostram integrações entre sistemas IT (Tecnologias de Informação, isto é, sistemas de gestão e de suporte à decisão) e OT (Tecnologias Operacionais, isto é, sistemas de automação e controlo do chão de fábrica) em simulação ou laboratório. Esta família reduz a complexidade de engenharia de integração e prepara a adoção industrial. A síntese quantitativa encontra-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Síntese quantitativa por tipo de estudo.

Tipo de Estudo	Nº de Artigos	%	Evolução temporal	Setor industrial	Integração I4.0	Impacto operacional	Contributo científico
Arquitetura	47	43,1	●●	●●●	●●●	○	●●●
Caso Real	19	17,4	●	●	●●	●●	●●
Caso Industrial	40	36,7	●●●	●●	●●	●●●	●●
Revisão Sist./Bibliométrica	3	2,8	—	—	—	—	●●

Legenda: ●●● = predominante | ●● = relevante | ● = presente | ○ = moderado | — = residual

Os casos reais funcionam como validação prática com dados reais em ambientes controlados. Fornecem provas de aplicação e estabilizam requisitos de coerência temporal, qualidade dos registos e interoperabilidade, antes da transferência para o chão de fábrica.

Os casos industriais confirmam o MES como sistema coordenador da operação com capacidade de análise de dados (*analítica operacional*). Observam-se reduções consistentes de defeitos e de desperdício, bem como melhorias da taxa de conformidade de primeira escolha e OEE, quando o MES fecha o ciclo de decisão através da recolha sistemática de dados, da aplicação de regras e de analítica operacional e da concretização de ações no ponto de execução [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36]. Verifica-se ainda diminuição do tempo total de ciclo produtivo e do WIP, associada ao despacho automático de ordens, aos mecanismos de bloqueio e libertação e à sequenciação baseada em eventos de produção, conforme evidenciado em diversos casos industriais [37] [38] [39] [40]. Em termos de integração tecnológica, os casos industriais mostram ligação entre planeamento de recursos empresariais ou *Enterprise Resource Planning* (ERP) e planeamento e sequenciação avançada (*Advanced Planning and Scheduling*) (APS) e automação controlo de supervisão e aquisição de dados ou *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e controladores lógicos Programáveis ou *Programmable Logic Controller* (PLC), com uso da arquitetura unificada de comunicações de plataforma aberta ou *OPC Unified Architecture* (OPC UA) ou do padrão de comunicação de equipamentos e controlo de semicondutores, também denominado de *Semiconductor Equipment Communication Standard – Generic Equipment Model* (SECS GEM). Esta arquitetura cria visibilidade global do processo produtivo com leitura de ponta a ponta ao longo das diferentes etapas internas, assegurando a rastreabilidade e o alinhamento entre indicadores operacionais e de gestão [41] [33] [42] [36]. Em vários estudos, as métricas energéticas e ambientais passam a integrar a rotina de operação, tornando visível o consumo e suportando decisões que reduzem energia e emissões [43] [44] [45].

As Revisões Sistemáticas e Bibliométricas não intervêm diretamente na operação, mas desempenham um papel estruturante. Consolidam o conhecimento, identificam tendências e lacunas e sintetizam princípios de interoperabilidade, gestão responsável dos dados e segurança da informação industrial, fornecendo um enquadramento de referência para a implementação. A análise quantitativa da Tabela 3.2 indica crescimento mais acentuado nos Casos Industriais, coerente com a expansão recente da digitalização fabril. A integração na I4.0 surge predominante em Arquitetura, por explicitar camadas digitais como IoT, *Cloud* e DT, e mantém relevância em Casos Reais e Industriais, onde a integração é comprovada funcionalmente mesmo quando o termo I4.0 não é mencionado de forma explícita. O contributo científico resulta do equilíbrio entre produção teórico-metodológica e validade externa das evidências. Assim, os estudos de Arquitetura oferecem artefactos reutilizáveis e os Casos Industriais fornecem conhecimento transferível sobre parâmetros de processo, regras operacionais e práticas de integração. A Figura 3.15 sintetiza esta dinâmica, representando os alicerces técnicos à esquerda e os

resultados operacionais à direita. O MES surge no centro como sistema coordenador com capacidade de análise de dados (análítica operacional), traduzindo o fecho de ciclo entre dados, decisão e ação, suportado por integrações estáveis e dados fiáveis.



Figura 3.15 - MES, sistema coordenador (fonte própria).

O conjunto de evidências confirma a transição do MES de sistema centrado na execução para sistema coordenador orientado por dados. A contribuição materializa-se na integração de fontes de dados diversas, na interoperabilidade entre sistema IT e sistema OT, na sincronização entre sistemas e eventos produtivos e na decisão em tempo praticamente real, com um atraso muito reduzido, suficiente para suportar a decisão operacional durante o próprio processo. Registam-se melhorias de qualidade, redução da duração total do ciclo produtivo, diminuição da variabilidade e das interrupções e redução do consumo energético [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [37] [46] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45]. Quando observada, a redução da variabilidade deve ser interpretada como um efeito indireto da normalização dos métodos de execução, da monitorização contínua e da deteção precoce de desvios proporcionadas pelo MES, e não como um efeito direto da sua simples implementação. A consolidação deste papel exige modelos de dados partilhados [40] [47], gestão responsável dos dados [48] [38] e infraestruturas digitais com sincronização temporal rigorosa [49] [46]. Com estes alicerces, e com a utilização de tecnologias preditivas e prescritivas suportadas por IA e DT [49] [48] [44], o MES evolui para plataforma de decisão integrada [49] [44] que sustenta simultaneamente competitividade [50] [38] [40] e sustentabilidade na engenharia industrial [44] [43]. Esta análise aprofunda a forma como o MES apoia a decisão e onde gera impacto operacional nos 40 casos industriais identificados no conjunto de artigos. Conforme apresentado na Tabela 3.3, os estudos posicionam o MES no centro da arquitetura digital da fábrica, onde o sistema liga planeamento e execução, assegura

dados fiáveis e assume um papel de coordenação da operação suportado por analítica operacional e integrações estáveis.

Tabela 3.3 - Funções do MES e mecanismos de impacto.

Mecanismo / Ação	Nº de Artigos	Artigo número
Qualidade de primeira escolha (FPY)	18	[30] [31] [33] [34] [35] [46] [44] [39]
Lançamento e sequenciação de ordens	13	[47] [41] [33] [34] [38] [39] [40]
Visibilidade global do processo produtivo	11	[47] [41] [33] [34] [44] [40] [42]
Eficiência Global do Equipamento (OEE)	9	[29] [31] [32] [33] [34] [35] [46]
Bloqueios e libertações	8	[37] [33] [38] [39] [40] [42]
Métricas energéticas e ambientais	6	[32] [43] [44] [45]
Redução da duração total do ciclo produtivo (<i>lead time</i>)	5	[37] [33] [39] [40]
Redução do trabalho em curso (WIP)	4	[33] [39] [42] [36]

Em primeiro lugar, confirma-se a visibilidade global do processo produtivo com leitura de ponta a ponta ao longo das diferentes etapas através da captação frequente de estados e medições com IoT, internet das coisas industrial ou *Industrial Internet of Things* (IIoT) e Identificação Automática (Auto-ID). Como elenca a Figura 3.16, esta base sustenta indicadores como OEE e apoia decisões de curto prazo [47] [41] [33] [34] [44] [40] .

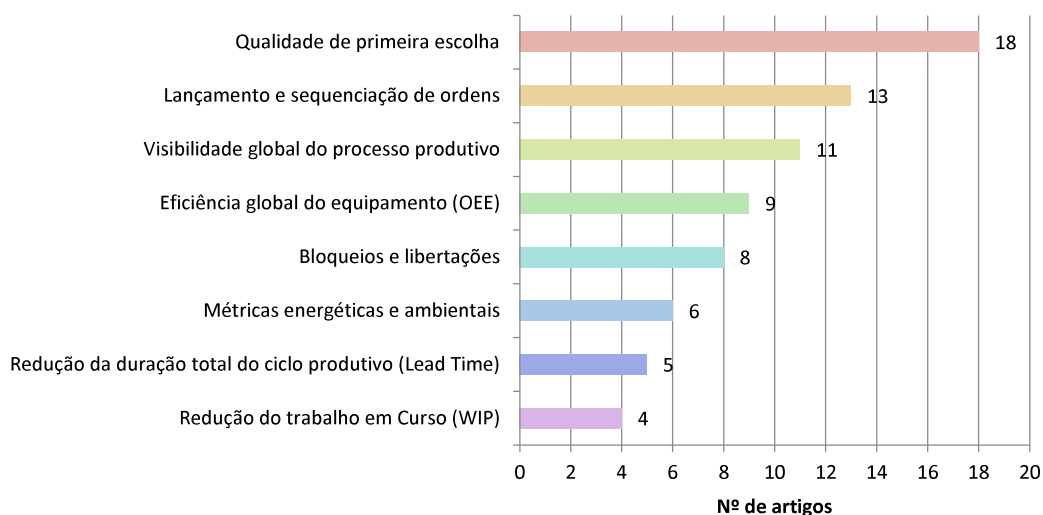


Figura 3.16 - Principais mecanismos de impacto reportados no universo dos 109 artigos (fonte própria).

Em segundo lugar, o MES atua como ponte [50] [47] entre o ERP [51] [50] [42], responsável pelo planeamento de recursos e ordens [50] [42], e o APS, dedicado à otimização de sequências

e capacidades produtivas, articulando ambos com o chão de fábrica [50] [47] [30]. As decisões são materializadas através do lançamento e sequenciação de ordens, libertações e bloqueios e da reordenação ou replaneamento, em coordenação com o SCADA e os PLC. Como se observa na Tabela 3.3 e na Figura 3.16, este papel confirma o MES como núcleo transacional da integração vertical [47] [33] [41] [34] [37] [38] [39]. Com a adoção de serviços em *Cloud* e analítica, o MES evolui de integração de dados para coordenação orientada por dados. Como ilustra a Figura 3.17 as decisões operacionais passam a ser suportadas por análises e previsões, completando o ciclo entre dados, decisão e ação [29] [47] [32] [38] [45].

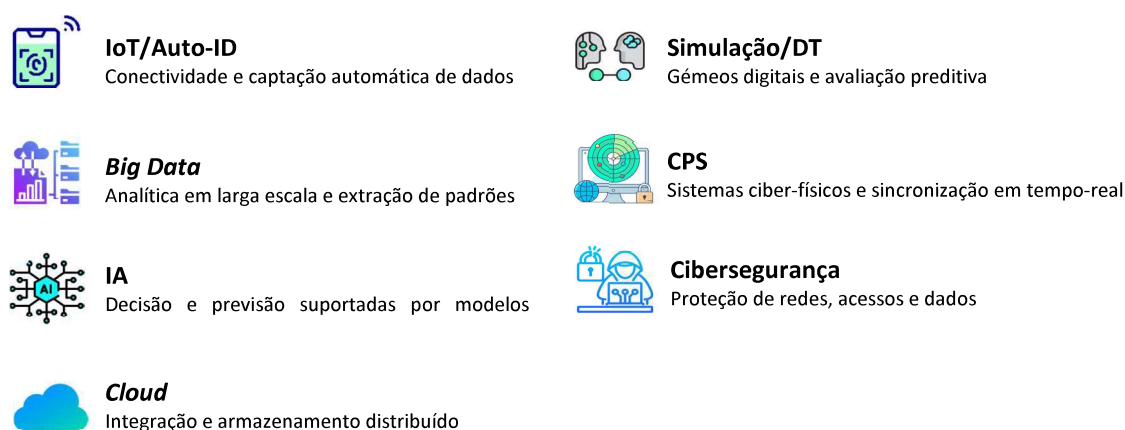


Figura 3.17 - Distribuição das tecnologias da Indústria 4.0 integradas no MES (fonte própria).

Os impactos observados incluem redução de defeitos e de desperdício, melhoria da Qualidade de Primeira Escolha ou *First Pass Yield* (FPY) e do OEE quando o sistema fecha o ciclo de decisão [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35]. Verifica-se também diminuição do WIP e, em alguns estudos, menor *lead time*. As métricas energéticas e ambientais passam a integrar a rotina de operação, tornando visível o consumo e suportando decisões que reduzem energia e emissões [32] [43] [44] [45]. A segurança da informação industrial e o controlo de acessos ganham relevância nos casos mais recentes, com segregação entre redes IT e OT, Zonas Desmilitarizadas (DMZ), isto é, áreas de segurança intermédia entre as redes IT e OT que filtram e controlam o fluxo de dados, e gestão rigorosa de perfis, sobretudo em contextos de operação remota e soluções em *Cloud* [52] [53] [29]. No conjunto, o MES consolida-se como base para estratégias orientadas por dados e CPS, assegurando a continuidade da sequência produtiva desde a captação até à execução da decisão [47] [31] [29] [40].

Os casos industriais evidenciam uma implementação real e um impacto mensurável em ambiente produtivo, permitindo identificar de forma objetiva as tecnologias que, ao longo de 20 anos, sustentaram a evolução do MES de sistema de execução para sistema coordenador orientado por dados. Entre 2004 e 2025 observa-se um percurso consistente de integração tecnológica com o MES. O período inicia-se com integrações fundacionais centradas na captação automática e na normalização de dados e evolui para um modelo orientado por dados,

no qual o MES coordena ações no chão de fábrica, como o lançamento e a sequenciação de ordens, liberações, bloqueios e planos de manutenção apoiados em dados em tempo quase real [49] [47] [37] [31] [34] [29] [43] [40] [54] [55] [36].

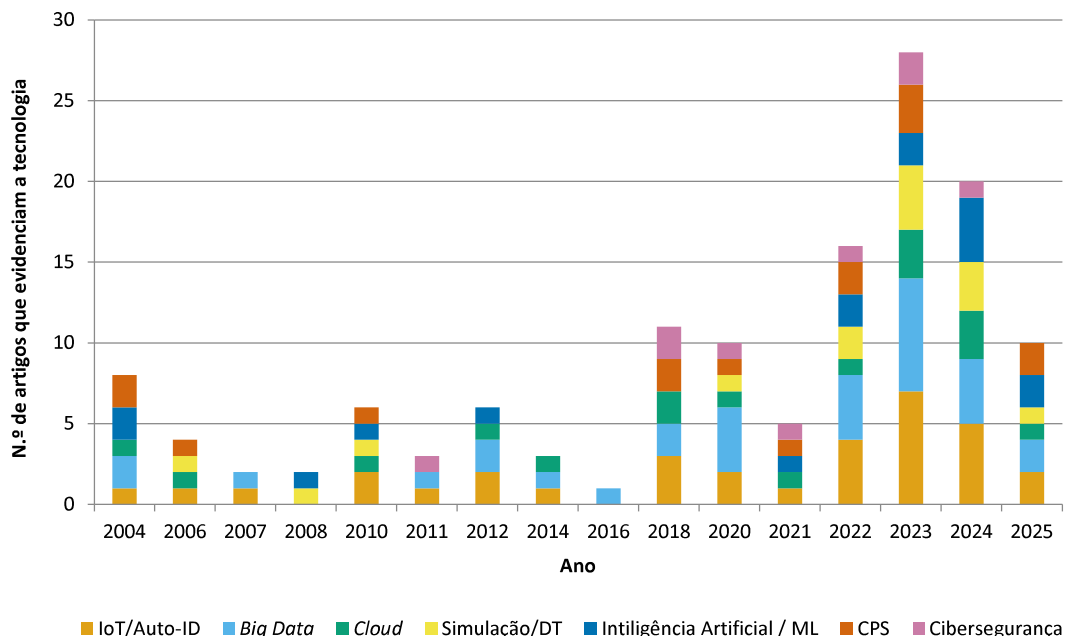


Figura 3.18 - Tecnologias I4.0 nos 40 casos industriais 2004–2025 (fonte própria).

A Figura 3.18 sintetiza a evolução da integração das tecnologias da I4.0 nos casos industriais com implementação de MES. A análise temporal revela que, entre 2004 e 2010, a ênfase recai sobre IoT e Auto-ID, tecnologias que se mantêm constantes em todo o período e que constituem a base da rastreabilidade e da visibilidade operacional. Após 2016 observa-se o aparecimento de BD e *Cloud*, o que evidencia a consolidação da analítica operacional e da partilha de dados em larga escala no contexto do MES. Estes elementos sugerem a transição do MES de um sistema predominantemente orientado ao registo para uma plataforma com capacidades analíticas de apoio à decisão. Entre 2020 e 2023 verifica-se um aumento significativo das integrações múltiplas, com destaque para a convergência entre BD, *Cloud* e CPS, o que indica o avanço para arquiteturas de integração vertical e horizontal. Este crescimento é acompanhado pelo reforço das preocupações com a cibersegurança, necessária para salvaguardar os fluxos de dados e garantir a continuidade operacional. Nos anos mais recentes surgem evidências pontuais de DT, AI e ML, associadas sobretudo à previsão de falhas, à manutenção preditiva e à recomendação automática de ações. A maturidade ainda limitada destas tecnologias sugere que a integração preditiva e prescritiva se encontra em fase de consolidação, embora já demonstre impacto positivo no desempenho e na eficiência global das operações.

De forma global, a interpretação da Figura 3.19 confirma três tendências centrais. Primeiro, a IoT e a Auto-ID mantêm-se como pilares estruturais, fornecendo visibilidade e rastreabilidade

ponta a ponta. Segundo, o BD e a *Cloud* representam a camada de análise de dados que transforma dados dispersos em conhecimento acionável, permitindo ao MES atuar com menor latência. Terceiro, o CPS, o DT, a AI e a ML ampliam a capacidade do sistema para antecipar, recomendar e executar decisões no chão de fábrica.



Figura 3.19 - Tendências centrais da integração tecnológica com o MES 2004–2025 (fonte própria).

Este encadeamento revela a consolidação do MES como sistema coordenador inteligente que fecha o ciclo dados-decisão-execução, sustentado por arquiteturas interoperáveis e por gestão responsável da informação [29] [30] [38] [40] [52]. O resultado operacional manifesta-se na melhoria do OEE, na redução da duração total do ciclo produtivo e das paragens e na diminuição do consumo energético, quando o MES integra de forma coerente as tecnologias da I4.0, assegurando a articulação entre dados, processos e decisão [31] [29] [43] [40] [54]. Embora o MES assuma um papel central no ambiente industrial contemporâneo, a sua contribuição manifesta-se sobretudo como sistema de apoio à decisão humana. A sua função principal é potenciar a atuação informada e oportuna de operadores, supervisores e planeadores, traduzindo dados complexos em informação útil para a ação. A leitura integrada destes resultados permite identificar as dimensões que caracterizam a atuação do MES como sistema de suporte à decisão. Cada dimensão representa um eixo funcional através do qual o sistema transforma dados em ações, combinando visibilidade, coordenação, rastreabilidade e aprendizagem contínua. Conforme ilustrado na Figura 3.20, estas dimensões constituem os pilares que sustentam o papel do MES na I4.0.



Figura 3.20 - Dez dimensões de suporte do MES (fonte própria).

Existem 10 dimensões identificadas de suporte ao MES, em que cada uma representa uma forma distinta através da qual o MES apoia a tomada de decisão humana no contexto industrial. Estas dimensões são as seguintes:

1. Visibilidade operacional e alerta contextual: O MES agrega estados de máquinas, ordens e qualidade em painéis digitais e *andons* (sinalização visual de estado), atualizados em tempo quase real. Estes mecanismos assinalam desvios relevantes e orientam a atenção das equipas para o ponto crítico, reduzindo o tempo médio de deteção de problemas [31] [29] [54] [40];
2. Rastreabilidade e histórico de fabrico: Através de tecnologias de identificação por rádio frequência ou *Radio Frequency Identification* (RFID) e Auto-ID e de protocolos industriais como o SECS GEM, o MES reconstrói o registo histórico de cada lote ou peça. Este registo suporta decisões imediatas sobre bloqueio, libertação ou recolha de produto, assegurando a rastreabilidade e o cumprimento das normas legais e de qualidade aplicáveis à produção industrial [41] [37] [34];
3. Indicadores operacionais acionáveis OEE, unidades por hora, *lead time*, refugo): O sistema calcula e apresenta indicadores-chave de desempenho por linha, turno e recurso, com possibilidade de detalhar as causas de variação. Estes indicadores permitem ajustar tempos de mudança, priorizar ordens e resequenciar recursos de forma sustentada [31] [46] [40];
4. Manutenção baseada na condição: A integração de sensores e plataformas de monitorização com o MES gera alertas de degradação e tarefas padronizadas, apoiando decisões sobre o momento ótimo de intervenção e reduzindo paragens não planeadas [54] [46];
5. Instruções de trabalho dinâmicas e gestão de situações não planeadas: O MES disponibiliza instruções atualizadas por modelo ou lote, regista desvios e aprovações e assegura rastreabilidade das decisões tomadas em situações excecionais. Este mecanismo diminui a dependência do saber prático dos operadores e reforça a consistência operacional [34] [40];

6. Análise de cenários e simulação (*what-if*): A ligação entre o MES e modelos virtuais ou DT possibilita testar diferentes cenários de produção antes da execução. Supervisores e planeadores podem avaliar o impacto de alterações na sequência ou nos recursos, e o sistema regista os resultados da opção escolhida [47] [31] [40] [46];
7. Integração vertical ERP–MES–SCADA/PLC: A coerência de dados entre os níveis de planeamento e execução reduz conflitos de informação e acelera decisões sobre replaneamento, cumprimento de prazos e conciliação de capacidade entre linhas e turnos [47] [34] [40];
8. Cibersegurança e gestão de perfis e acessos: O registo de auditoria e a separação entre redes IT e OT aumentam a confiança nas decisões humanas e asseguram a rastreabilidade das ações executadas, com impacto direto na segurança e no cumprimento das normas legais e de qualidade aplicáveis à produção industrial [52] [40];
9. Sustentabilidade e eficiência energética: Ao disponibilizar métricas de consumo e emissões nos ecrãs operacionais, o MES permite decisões que equilibram produção e impacto ambiental, apoiando metas de sustentabilidade e de eficiência energética [43];
10. Partilha de conhecimento e aprendizagem organizacional: O registo estruturado de ações, comentários e lições aprendidas no ambiente do MES reforça a consistência das decisões entre turnos e acelera a aprendizagem coletiva das equipas [49] [40].

Os 40 casos industriais mostram que o MES se consolida como núcleo cognitivo e operacional das fábricas modernas. O seu valor não se limita à automatização, estendendo-se à capacidade de transformar dados dispersos em informação contextual que sustenta a decisão humana. Ao articular sistemas e pessoas, o MES promove eficiência operacional, rastreabilidade, confiança e aprendizagem organizacional contínua, constituindo um pilar essencial da fábrica orientada por dados e pela melhoria contínua [47] [31] [46] [40] [34] [43]. Na sequência da análise dos casos de estudo, observa-se que diversos resultados quantitativos são documentados após a integração com o MES, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Resultados após a integração com o MES dos casos industriais.

Indicador / Categoria	Setor / Indústria	Significado / Interpretação	Evidência prática e valores reportados
Eficiência global do equipamento (OEE)	Automóvel, Eletrónica e semicondutores, Moldes e plásticos, Têxtil e vestuário	Indicador composto que agrega disponibilidade, desempenho e qualidade. Suporta decisões com painéis visuais de estado atualizados em tempo quase real	Ganhos entre 3 e 15% no OEE, associados à visibilidade das paragens e à priorização de ordens e ações corretivas automáticas com o apoio do [31] [46] [40].
Taxa de produção (<i>throughput</i>), Produtividade e Unidades por hora (UPH)	Automóvel, Eletrónica, Alimentar e bebidas, Moldes	Quantidade produzida por unidade de tempo. Reflete o ritmo produtivo e a taxa de produção.	Aumentos entre 5 e 25%, com redução dos tempos de espera e melhor utilização dos turnos de trabalho através da otimização dos tempos de mudança [31] [46] [40].
Qualidade, Refugo	Eletrónica e semicondutores, Moldes e plásticos, Automóvel	Porcentagem de peças rejeitadas e de defeitos de produção.	Reduções entre 10 e 40%, sustentadas pela rastreabilidade, identificação automática com RFID e Auto-ID e bloqueio de lotes não conformes em tempo quase real [41] [37] [34].

Tabela 3.4 - Resultados após a integração com o MES dos casos industriais (continuação).

Disponibilidade Operacional, MTBF e MTTR	Eletrónica e semicondutores, Automóvel, Metalomecânica	MTBF significa tempo médio entre falhas; MTTR significa tempo médio de reparação.	Aumento da disponibilidade entre 2 e 12%, redução do MTTR e aumento do MTBF com monitorização contínua e manutenção baseada na condição [56] [57].
Duração total do ciclo produtivo (<i>lead time</i>) e Tempo de Ciclo	Automóvel, Eletrónica, Têxtil e vestuário	Tempo total entre a emissão e a obtenção do produto final ao longo do processo produtivo.	Reduções entre 8 e 30%, resultantes da sincronização vertical entre ERP e MES e do fecho do ciclo entre recolha de dados, decisão e execução [47] [34] [40].
Energia e sustentabilidade	Automóvel, Eletrónica, Processo químico e energia	Eficiência energética e impacto ambiental do processo produtivo.	Reduções entre 3 e 12% no consumo energético específico, quando o MES integra métricas energéticas nos painéis de apoio à decisão operativa [43].
Inventário e trabalho em curso (WIP)	Automóvel, Eletrónica, Têxtil, Moldes	Nível de trabalho em curso e stocks intermédios em processo.	Reduções do WIP reportadas em vários estudos, com melhoria da visibilidade de ordens e controlo de fluxo de produção. A quantificação varia consoante o contexto industrial [47] [34] [40].
Tempo de mudança de ferramenta (<i>setup</i>)	Moldes e plásticos, Automóvel, Eletrónica	Tempo necessário para Tempo de mudança de ferramentas, moldes ou modelos. Inclui preparação e validação.	Reduções entre 5 e 20% quando o MES fornece instruções guiadas e apoia a sequenciação dos tempos de mudança [34] [40].
Pontualidade de entrega (OTD) e serviço ao cliente	Automóvel, Eletrónica, Alimentar bebidas	Cumprimento de prazos e fiabilidade logística.	Melhoria da pontualidade de entrega, sustentada pela integração entre planeamento (ERP) e execução (MES) [47] [40].
Indicadores de manutenção e alerta operacional	Eletrónica e semicondutores, Automóvel	Eventos de manutenção, alarmes e decisões preventivas com analítica operacional em tempo quase real.	Aumento da rapidez na deteção de falhas e alarmes, permitindo decisões de intervenção em tempo quase real [31] [34] [40].

As melhorias quantitativas mais expressivas verificam-se nos indicadores de OEE, taxa de produção e qualidade, evidenciando o fecho de ciclo entre dados, decisão e execução. Observam-se igualmente reduções na *lead time*, no WIP e no tempo de mudança de ferramenta, confirmando ganhos de eficiência operacional sustentados pela visibilidade e pela sincronização vertical. A energia e a sustentabilidade emergem como uma nova dimensão de decisão operacional após 2020, com métricas integradas no próprio MES. No conjunto, a Figura 3.21 sintetiza estes resultados, mostrando a consolidação do MES como plataforma de decisão orientada por dados e desempenho operacional.

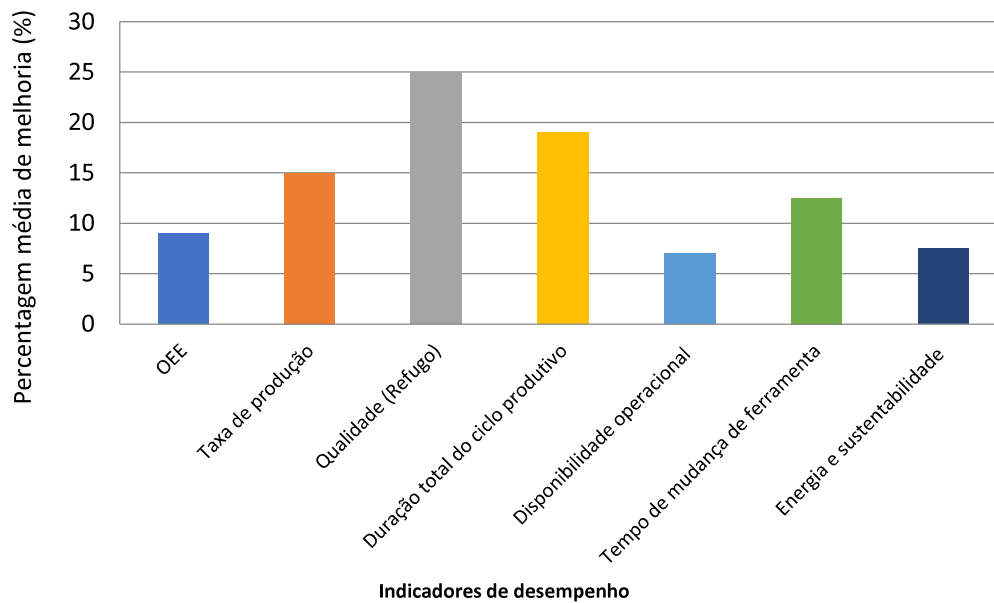


Figura 3.21 - Indicadores com maior variação positiva após integração com o MES (fonte própria).

Globalmente, o MES evolui de sistema de registo para plataforma de decisão operacional, evidenciando ganhos médios entre 10 e 20% na eficiência produtiva e reduções entre 10 e 30% nas perdas de tempo e de material. Esta transformação assenta na redução do ciclo medir-decidir-agir, representado na Figura 3.22.

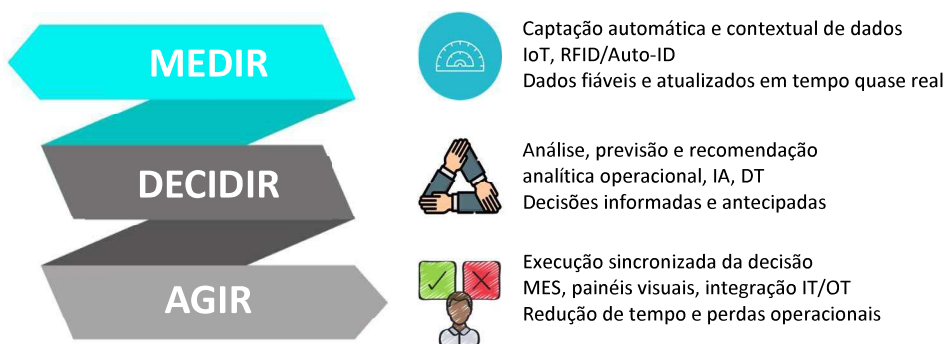


Figura 3.22 - Ciclo “medir-decidir-agir” no MES (fonte própria).

Nos 40 casos analisados observa-se a transição do MES de um sistema de registo para um centro de decisão operacional baseado em dados. Os dados captados em tempo quase real deixam de servir apenas para consulta e passam a suportar decisões que se executam no próprio MES, como a resequenciação de ordens, bloqueios, libertações, abertura de ordens de manutenção e emissão de instruções ao operador. Conforme se articula na Figura 3.22 esta atuação encurta o ciclo entre medir, decidir e agir e traduz-se em ganhos de OEE, produtividade e qualidade quando associada a painéis visuais de estado e a alertas contextuais [31] [46] [40] [54]. Para antecipar problemas e agir antes da falha são incorporadas análises preditivas que

estimam avarias e variações de desempenho. A Figura 3.23, evidencia que o MES recebe estas previsões e transforma-as em tarefas operacionais com intervenções em janelas de menor impacto, reduzindo paragens e melhorando a fiabilidade, sobretudo em ativos de maior criticidade, conforme a trajetória de maturidade analítica [31] [46] [54]. A infraestrutura técnica assenta num modelo de atualização contínua de estados, contagens e alarmes, o que permite escalar para várias linhas e locais sem perda de tempo de resposta, desde que a arquitetura seja dimensionada para crescer [47] [46] [40].

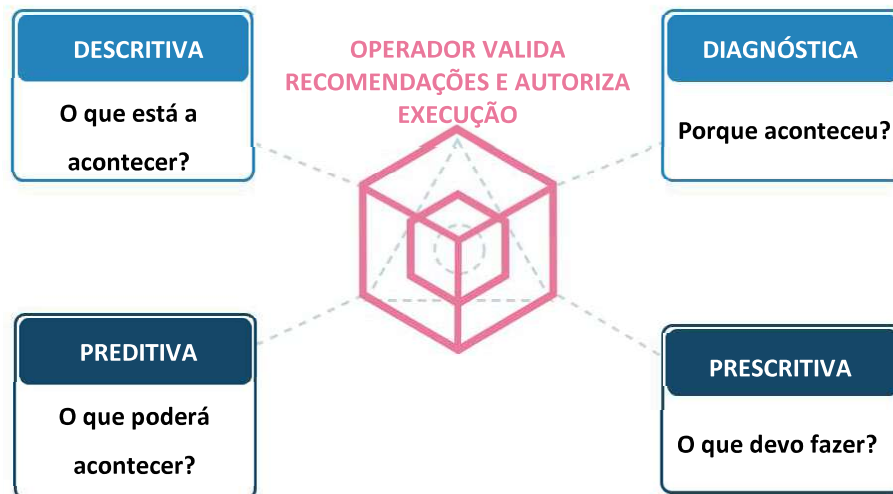


Figura 3.23 - Integração gradual de IA e analítica explicável no MES (fonte própria).

A integração eficaz depende de um modelo comum de dados e de operações entre o ERP, o MES e o SCADA. Referenciais como a norma de integração entre sistemas de empresa e sistemas de controlo ou *International Society of Automation Standard 95* (ISA-95) e a arquitetura unificada de comunicações de plataforma aberta ou *OPC Unified Architecture* (OPC UA) asseguram consistência semântica e aceleram a interoperabilidade, permitindo a comunicação entre equipamentos e software de diferentes fabricantes através de interfaces normalizadas, conforme representado no esquema de camadas e interfaces da Figura 3.24 [47] [40]. Os modelos de simulação e os DT aproximam-se do ciclo operativo ao correrem com dados reais para testar cenários antes da execução, sincronizando planeamento e chão de fábrica e reduzindo o risco de resequenciação desnecessária. A Figura 3.22 e Figura 3.24 apresentam o encadeamento com a decisão operativa [47] [31] [40] [46].

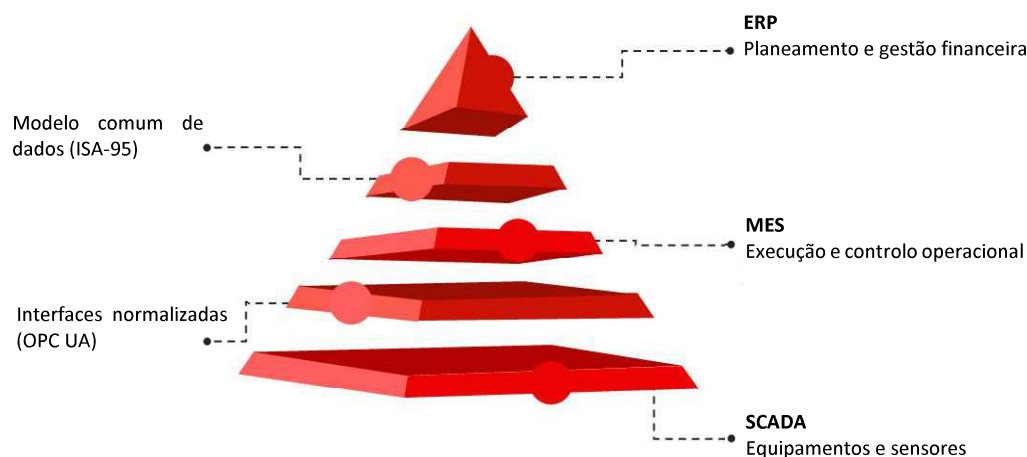


Figura 3.24 - Modelo comum de dados e interoperabilidade entre MES, ERP e SCADA (fonte própria)

A adoção de AI e ML é incremental e centrada no ser humano. O operador mantém-se no circuito de decisão, com recomendações explicadas e validadas antes da execução, o que aumenta a aceitação e reduz erros não previstos. Através da Figura 3.23 elenca como o sistema mantém registos de auditoria e autorizações, reforçando o cumprimento das normas legais e de qualidade aplicáveis à produção industrial, conforme o enquadramento da analítica explicável [31] [46] [40] [52]. Em paralelo, a cibersegurança é concebida desde a origem com segmentação de redes, princípios de mínimos privilégios e DMZ, que protege dados e comandos em alinhamento com a arquitetura representada na Figura 3.24 [47] [46] [52]. No plano organizacional, os casos analisados evidenciam operações em várias unidades fabris baseadas em modelos corporativos de MES. As empresas reutilizam modelos de dados, regras e indicadores para implementações rápidas e comparáveis entre unidades, acelerando expansões e permitindo uma comparação consistente de desempenho. Estas práticas são sustentadas por arquiteturas modulares e pela integração colaborativa entre robôs colaborativos (*cobots*) e MES, conforme apresentado na Figura 3.25 [47] [46] [40]. O MES integra métricas de energia, emissões e perdas nos ecrãs operacionais, permitindo ponderar produção e impacto energético em tempo quase real, contribuindo para as metas de sustentabilidade [43].

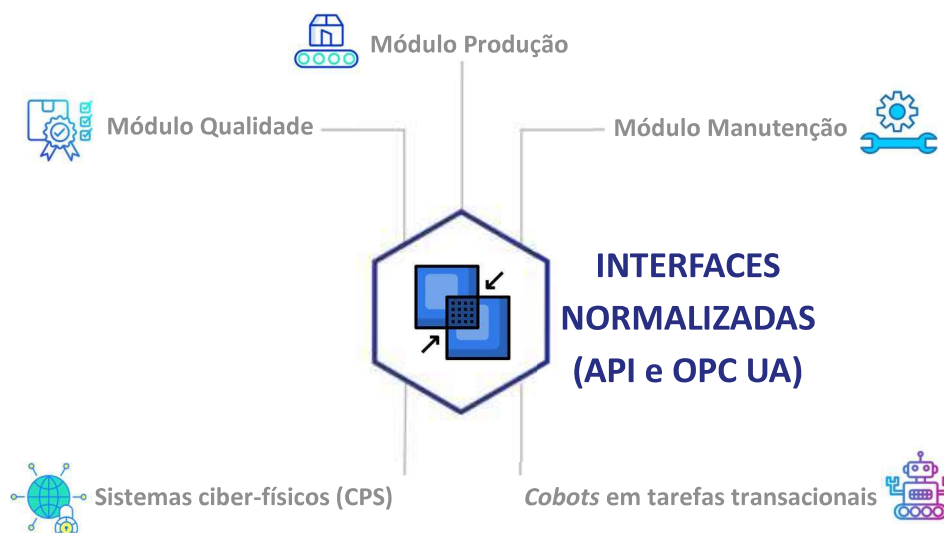


Figura 3.25 - Arquitetura modular e integração entre *cobots* e MES (fonte própria).

No posto de trabalho cresce a ligação a CPS e a colaboração humano robô *cobots*. O MES agenda tarefas com *cobots* como entidades transacionais e aplica condições de segurança funcional resultando em maior flexibilidade com segurança operacional tal como se representa na Figura 3.25 [47] [32] [40]. Nesta arquitetura modular, o MES atua como núcleo de integração entre módulos funcionais e tecnologias operacionais. As interfaces normalizadas (Interface de Programação de Aplicações ou *Application Programming Interface* e OPC UA) asseguram interoperabilidade entre módulos de produção, qualidade e manutenção, CPS e *cobots* responsáveis por tarefas transacionais. Esta estrutura favorece a escalabilidade, a reutilização de componentes e a integração fluida entre decisão humana e automação colaborativa. Em síntese, o futuro do MES caracteriza-se pela transformação num centro de decisão operacional baseado em dados. A trajetória evolutiva que conduz o MES de sistema de registo a sistema cognitivo de decisão encontra-se representada na Figura 3.26 [29] [47] [31] [32] [46] [43] [40] [52].

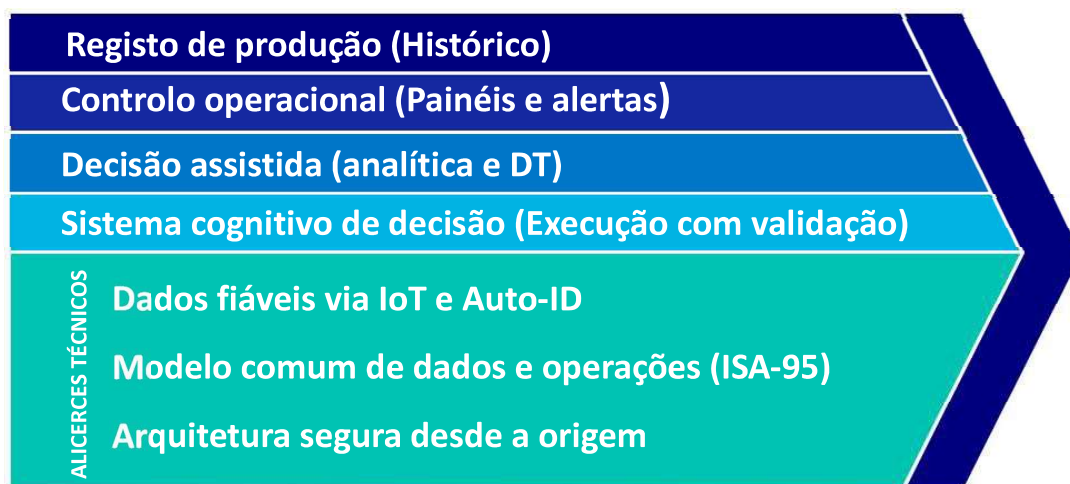


Figura 3.26 - Síntese evolutiva do MES (fonte própria).

Esta progressão resulta da consolidação de alicerces técnicos assentes em dados fiáveis IoT e Auto-ID, em modelos comuns de dados e operações (ISA-95) e em arquiteturas seguras concebidas desde a origem. O MES transforma-se assim numa plataforma que combina analítica, DT e execução validada, sustentando decisões operacionais em tempo quase real com base em informação contextual e fiável.

Constata-se que a tendência do MES é assumir um papel ativo no ecossistema fabril. O sistema deixa de ser predominantemente um repositório de registo e monitorização para se afirmar como orquestrador operativo, articulando dados, decisão e execução, com validação humana no circuito para garantir contexto, responsabilização e conformidade. Esta evolução é sustentada pela integração entre IT e OT, pela analítica operacional em plataformas de dados e por mecanismos de segurança e controlo de acessos, permitindo decisões mais rápidas, consistentes e auditáveis. A evidência que fundamenta esta leitura encontra-se sintetizada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Evidência empírica e implicações do MES enquanto plataforma de decisão industrial.

Dimensão observada		Citações evidenciadas	Implicação para o papel do MES
Integração ERP, MES, SCADA e PLC		Fluxo coerente entre planeamento e execução, despacho de ordens, resequenciação, bloqueios e libertações [47] [34] [40].	Papel ativo na execução operacional
Visibilidade indicadores operacionais	de	Indicadores por linha, turno e recurso: OEE, unidades por hora (UPH), duração total do ciclo produtivo e refugo, com exploração detalhada das causas para atuação em curto prazo [31] [46] [40].	Indicadores acionáveis (KPIs) que orientam priorizações e ajustes operacionais
Rastreabilidade histórico de fabrico	e	Decisões de qualidade informadas: bloqueio, libertação, segregação e recolha de produto [41] [37] [34].	Informação de rastreio desencadeia decisões auditáveis
Análítica operacional e computação em <i>Cloud</i>		Tratamento de grandes volumes de dados e uso de <i>Cloud</i> para gerar recomendações e resposta rápida [47] [29] [38] [45].	Orquestração com controlo humano no circuito para validação
Simulação e gémeo digital ligados ao MES		Comparação de cenários antes de atuar e execução da opção selecionada, com registo do efeito [47] [31] [46] [40].	Fecho do ciclo entre dados, decisão e execução
Cibersegurança controlo e acessos	e	Segmentação entre domínios IT e OT, zona desmilitarizada (DMZ), perfis de acesso e registos de auditoria [47] [53] [46] [52].	Condições técnicas para agir com confiança e conformidade
Replicação unidades fabris	entre	Modelos corporativos de dados e regras replicados entre fábricas, com variações locais controladas [47] [46] [40].	Escala e padronização de práticas e indicadores

A tendência dominante evidencia um MES com um papel ativo enquanto orquestrador operativo e transacional, mantendo o ser humano no circuito para validação e responsabilização. O foco desloca-se da recolha e monitorização para a ação coordenada, suportada pela integração entre IT e OT, pela analítica operacional e por mecanismos de segurança e controlo de acessos. Este posicionamento aumenta a velocidade, a coerência e a rastreabilidade das

decisões no chão de fábrica e favorece a replicação de práticas eficazes em várias unidades fabris. O MES assume-se como a porta de entrada para a I4.0 [49] [52] [29] [42], sendo essencial para garantir a integração vertical [49] [47], a visibilidade em tempo real [29] [42] e a capacidade de reconfiguração [49] [42] necessárias para uma implementação consistente, rastreável e escalável [52] [49]. Podem ocorrer ganhos localizados com sensores, sistemas SCADA/PLC ou soluções analíticas isoladas, mas o verdadeiro salto para um impacto sustentado verifica-se quando as decisões são concretizadas no chão de fábrica de forma rastreável, segura e replicável entre unidades fabris. Este resultado é alcançado quando o MES fecha de forma efetiva o ciclo entre dados, decisão e execução.

Capítulo 4

Discussão

O capítulo apresenta a interpretação crítica dos resultados obtidos e a sua relação com os objetivos da investigação. A análise integra as evidências empíricas e bibliométricas dos 109 artigos revistos, mostrando como o MES evoluiu de uma função predominantemente operacional para uma plataforma de suporte à decisão industrial. A discussão mobiliza o enquadramento teórico da Indústria 4.0 e a literatura recente como contexto de referência para interpretar os resultados centrados no MES, ilustrando, com base nos estudos analisados, a integração crescente de tecnologias digitais e de mecanismos de análise de dados em tempo praticamente real. São ainda discutidas as implicações práticas para a gestão responsável da produção e as contribuições do estudo para o avanço do conhecimento científico sobre o papel do MES na transformação digital.

4.1. A evolução, a implementação e as tendências do MES

A Figura 3.15, a Figura 3.26 e a Tabela 3.2 e Tabela 3.5 mostram que o MES, nos casos analisados, deixou de desempenhar apenas funções de registo e controlo local e passou a assumir um papel de plataforma de coordenação da decisão operacional. Esta evidência confirma a trajetória histórica identificada no enquadramento teórico, em que o sistema se desloca de uma lógica reativa para um papel ativo na integração vertical e na sincronização entre planeamento e execução, em linha com a literatura recente sobre fábricas inteligentes e sistemas de execução avançados [58] [59] [6] [60] [61]. Os resultados bibliométricos do Capítulo 3 reforçam esta leitura ao evidenciarem um crescimento sustentado de publicações centradas em conectividade, interoperabilidade, análise de dados operacionais e fabrico inteligente, o que confirma a centralidade do MES nas arquiteturas digitais associadas à I4.0 [53] [62] [40] [63] [64].

A leitura conjunta dos contributos teóricos e dos 40 casos industriais mostra que a implementação do MES está associada à disponibilização de indicadores de desempenho mais completos, à redução de tempos de ciclo e à melhoria de métricas como OEE, WIP e eficiência energética, tal como sintetizado na Tabela 3.4 e Tabela 3.5. Estes resultados respondem à segunda questão de investigação, evidenciando que os ganhos operacionais mais significativos ocorrem quando o sistema é implementado como elemento articulador entre ERP, APS, SCADA, PLC e plataformas digitais, reforçando visibilidade operacional e estabilizando o ciclo “medir, decidir e agir” representado na Figura 3.22 [50] [65] [66] [67] [40] [64]. Esta posição é coerente com estudos que documentam melhorias sistemáticas em OEE, *lead time* e qualidade em contextos industriais diversos [37] [68] [69]. A terceira questão de investigação é esclarecida pelas tendências tecnológicas observadas na literatura e nos casos mais recentes.

A incorporação progressiva de BD, serviços em *Cloud*, DT, CPS e modelos de AI e ML mostra que o MES se aproxima de uma plataforma de decisão industrial suportada por analítica preditiva e prescritiva [49] [70] [71] [66] [44] [72] [6]. A evidência integrada dos 109 artigos analisados indica que o sistema não se configura como uma tecnologia transitória, mas como componente estrutural da arquitetura digital das operações. O MES consolida o seu papel ao articular dados, modelos analíticos e execução [38] [73] [59] [74] [6], criando valor de forma consistente através da melhoria de indicadores operacionais e energéticos [68] [75] [72] [45] [76] e da capacidade para apoiar decisões em tempo quase real [73] [74].

Este enquadramento confirma que o sistema ultrapassou o papel histórico de execução e se afirma como mediador estável entre dados, decisão e ação em ambiente I4.0, preparando os subcapítulos seguintes, dedicados à evolução histórica do MES, à sua integração tecnológica e às direções futuras identificadas no corpus analisado.

4.2. Evolução do MES, e o seu papel na arquitetura dos sistemas produtivos

A resposta a Q11, é que a evolução do MES acompanha a trajetória de transformação dos sistemas produtivos desde as primeiras formas de automatização até às arquiteturas digitais atuais. Os resultados bibliométricos apresentados na Figura 3.1 mostram que a investigação sobre MES se intensifica sobretudo após 2010, coincidindo com a consolidação do paradigma da I4.0 [49] [47] [30] [77] [78] [79] [66] [6] [80] [81], mas assenta em bases conceptuais desenvolvidas nas fases anteriores da industrialização, nomeadamente nos princípios do controlo e planeamento da produção, da automatização industrial, da integração vertical de sistemas, da normalização industrial (como a ISA-95) e da gestão da qualidade, que estruturaram o papel inicial do MES como camada intermédia entre o planeamento e o chão de fábrica [78] [77] [60] [82] [83] [84] [85] [86] [87] [88] [89] [90].

Na fase associada à Indústria 2.0 predominavam métodos de planeamento e controlo baseados em documentação física, medições pontuais e supervisão local, com forte dependência da experiência individual. As análises históricas de evolução dos sistemas de produção mostram que [34] [91] [48] [92] [93] [60] [64] [76] os fluxos de informação eram fragmentados e pouco normalizados, o que limitava a capacidade de coordenação em tempo útil [41] [34] [91] [68] [72] [42] [94] [92] [77] [78] [93] [95] [96] [97] [98] [99] [60] [64] [76].

Com a generalização da Indústria 3.0 e a disseminação de controladores lógicos programáveis e sistemas de supervisão [49] [55] [76], surgem as primeiras implementações de MES como resposta à necessidade de consolidar dados de produção, registar estados de máquina e apoiar funções de rastreabilidade e de gestão de ordens em ambiente digital [49] [33] [55] [100] [64] [76]. Estes artigos descrevem o MES como um sistema focado na execução, ainda com integração limitada com níveis superiores da arquitetura de sistemas. A transição para a I4.0 reconfigura este enquadramento, e revisões recentes mostram que [92] [49] [78] [29] [76] [80] [40] [66] [6] o MES deixa de ser apenas um sistema de registo e passa a desempenhar funções de coordenação entre sistemas empresariais e sistemas operacionais, apoiando decisões em tempo quase real [92] [77] [49] [78] [50] [29] [70] [47] [101] [102] [103] [91] [38] [66] [81] [97] [44] [69] [59] [74] [80] [40] [104] [6] [105] [64] [76]. A literatura evidencia a convergência entre MES, CPS e plataformas de comunicação industrial [92] [49] [82] [78] [102] [103] [106] [51] [66] [107] [44] [40] [75] [45] [84] [6], na qual normas de referência como a ISA 95 e modelos de integração orientados a serviços são utilizados para garantir consistência entre os níveis de planeamento, controlo e execução [78] [50] [102] [106] [51] [66] [67] [40] [104] [45] [84] [6] [85] [86] [89] [108]. Paralelamente, a adoção de tecnologias como IoT, recolha automática de dados e conectividade em rede amplia o papel do MES na monitorização contínua dos processos e na sincronização de recursos dispersos [29] [101] [103] [109] [83] [46] [97] [40]. Diversos estudos destacam que, nesta fase, o MES evolui para elemento central da fábrica inteligente. Análises conceptuais e estudos de caso mostram que [50] [103] [38] [73] [44] [87] [63] [74] [40] [72] [88]

[6] [86] [90] [89] [108] [64] o sistema incorpora funções de análise de dados, suporte à decisão [103] [38] [73] [44] [87] [63] [74] [72] [88] [86] [50], [90] e coordenação de fluxos materiais e informacionais ao longo de toda a cadeia de valor [50] [40] [72] [6] [64] [89] [108].

Esta leitura é coerente com os resultados empíricos obtidos nos casos industriais analisados no presente estudo, nos quais o MES surge como plataforma de integração entre sistemas de planeamento, equipamentos de chão de fábrica e tecnologias digitais de suporte à Indústria 4.0, confirmando a sua progressiva transformação de sistema de execução para plataforma de decisão industrial.

4.3. Implementação do MES e integração com tecnologias digitais

A resposta a Q12, mostra que o MES é implementado maioritariamente em contextos integrados e não como solução isolada. A análise dos 40 casos industriais sintetizados na Figura 3.17 e Figura 3.19 e na Tabela 3.4 e Tabela 3.5 evidencia que o MES se encontra acoplado a ecossistemas digitais que combinam sensores, redes industriais e plataformas de dados [47] [32] [46] [44] [40] [75] [72] [45], e serviços em *Cloud* [47] [32] [72] [45], num enquadramento típico de I4.0 [47] [32] [44] [40] [75] [72] [45]. Esta configuração confirma que o valor acrescentado do sistema resulta sobretudo da sua capacidade para receber, organizar e reenviar informação entre equipamentos, operadores e sistemas de planeamento, em vez de depender apenas de funcionalidades internas de controlo [92] [77] [79] [78] [110] [50] [70] [103] [66] [111] [80] [104] [112] [6] [105] [89] [108].

Em praticamente todos os casos revistos, a integração com tecnologias de IoT e Auto-ID constitui a base para a recolha contínua de dados de produção [41] [101] [103] [109] [35] [46]. Tags de identificação, sensores distribuídos e dispositivos conectados fornecem informação sobre estados de máquina, progresso de ordens, parâmetros de processo e eventos de qualidade, que o MES converte em registos estruturados e indicadores operacionais utilizados no seguimento da produção em tempo quase real [41] [101] [103] [109] [35] [46] [38] [88]. A ligação a plataformas de dados e infraestruturas em *Cloud* amplia estas capacidades, disponibilizando armazenamento escalável, processamento distribuído [71] [32] [106] [113] [97] [87] [74] [45] [6] e acesso a serviços de analítica que suportam a construção de dashboards, alertas e relatórios de desempenho [92] [29] [71] [73] [97] [69] [74] [6]. A integração com CPS e DT representa um passo adicional na direção de arquiteturas de decisão mais sofisticadas [70] [65] [103] [51] [67] [59] [6].

Estudos recentes descrevem soluções em que o MES fornece dados em tempo quase real para modelos virtuais de linhas ou células produtivas, que simulam cenários alternativos e avaliam antecipadamente o impacto de decisões de programação, manutenção ou mudança

operacional de produto, incluindo alterações no mix de produção, na sequenciação e nas trocas de referência na linha [70] [65] [103] [51] [67] [59]. Estes modelos permitem testar configurações, estimar tempos de ciclo e analisar compromissos entre produtividade, consumo energético e cumprimento de prazos, antes da implementação efetiva no chão de fábrica [70] [65] [103] [51] [59]. Esta lógica é consistente com os casos industriais em que se observam ganhos conjuntos de OEE, redução do *lead time* e desempenho energético após a integração do MES com plataformas de simulação e decisão, tal como evidenciado na Tabela 3.4 e Tabela 3.5. Os resultados reportados evidenciam ganhos típicos entre 10 e 20% na eficiência global do equipamento, reduções de 10 a 30% no lead time e no WIP e diminuições entre 5 e 25% nos refugos e nos consumos energéticos específicos, embora com variação associada ao setor e à arquitetura produtiva de cada caso [29] [31] [32] [33] [34] [35] [37] [39] [40] [43] [44] [45] [46].

A articulação com métodos de IA e ML surge como fator diferenciador nas implementações mais recentes [114] [103] [35] [67] [44] [63] [59] [62] [115]. Casos industriais e revisões de literatura mostram a utilização de modelos de previsão de falhas, deteção de anomalias e recomendação de ações, suportados em dados históricos e em fluxos em tempo quase real, cujos resultados são disponibilizados ao MES sob a forma de alertas, planos de intervenção ou propostas de ajuste de parâmetros [48] [35] [38] [44] [54] [72] [6] [94]. Em paralelo, estão a surgir abordagens que tornam os modelos de princípios de IA mais fáceis de compreender, com o objetivo de tornar mais transparentes as recomendações algorítmicas e reforçar a confiança de operadores e gestores nas decisões apoiadas por modelos [44] [88] [59] [103] [74] [114] [63]. De forma combinada, estes resultados mostram que o papel do MES na prática industrial se afasta de uma perspetiva centrada apenas na execução e aproxima-se de uma visão de plataforma de integração. O sistema atua como eixo de convergência entre dados de equipamentos, sistemas empresariais e serviços analíticos, assegurando coerência e sincronização entre níveis operativo e tático em ambientes de produção intensivamente digitalizados [50] [70] [65] [104] [6].

Desta forma, o Capítulo 4 não apenas mostra ganhos quantitativos em indicadores de desempenho, como também confirma empiricamente que o MES passou a ocupar uma posição central na arquitetura digital das fábricas inteligentes.

4.4. Tendências e direções futuras do desenvolvimento do MES

A resposta a Q13, representa a análise consolidada das publicações recentes e dos 40 casos industriais apresentados na Figura 3.18 e a Figura 3.26 demonstra que o desenvolvimento futuro do MES está a convergir para quatro direções principais apoiadas pela evolução da I4.0 e pela maturidade crescente dos ecossistemas digitais. Em primeiro lugar, verifica-se uma orientação clara para a integração preditiva e prescritiva. Os artigos analisados evidenciam que os modelos

de previsão e recomendação estão a ser incorporados diretamente nas funções do MES, permitindo antecipar desvios, ajustar parâmetros operacionais e apoiar decisões baseadas em dados em tempo quase real [116] [73]. Esta tendência resulta da aplicação combinada de algoritmos de ML, técnicas de manutenção preditiva e mecanismos de otimização distribuída que reforçam o papel do MES como plataforma de decisão inteligente. Em segundo lugar, observa-se o reforço estrutural da interoperabilidade entre sistemas de tecnologia de informação e sistemas de operação [50] [102] [107] [111] [40].

A literatura destaca a importância de modelos normalizados de dados e de ligações digitais consistentes para assegurar a coerência informacional desde o planeamento até à execução [50] [102] [66] [107] [112] [6] [108]. A adoção de arquiteturas orientadas a serviços e a integração com plataformas *cloud* industriais promovem maior conectividade e reduzem limitações associadas à fragmentação histórica entre aplicações. Em terceiro lugar, ganha relevo a sustentabilidade operacional [43] [69]. As publicações mais recentes mostram a incorporação de indicadores energéticos e ambientais nos ciclos de decisão, permitindo que o MES contribua para a redução do consumo específico de energia e para a monitorização de impactos ambientais [93] [43] [69] [45]. Esta evolução está alinhada com a necessidade crescente de integrar objetivos de eficiência e sustentabilidade na gestão da produção. A quarta tendência corresponde à explicabilidade e confiança digital [63] [115] [81]. A integração de métodos de analítica explicável e a necessidade de rastrear as decisões automáticas produzidas por algoritmos avançados são identificadas como condições essenciais para a sua aceitação industrial [46] [63] [115] [60]. A crescente automação das decisões exige transparência e mecanismos de validação que assegurem segurança operacional e confiança no comportamento dos modelos [63] [115] [98] [117] [60] [61].

Estas quatro tendências convergem para a consolidação do MES como núcleo cognitivo da fábrica inteligente, articulando recolha de dados, analítica avançada e execução sincronizada, como ilustrado na Figura 4.1.

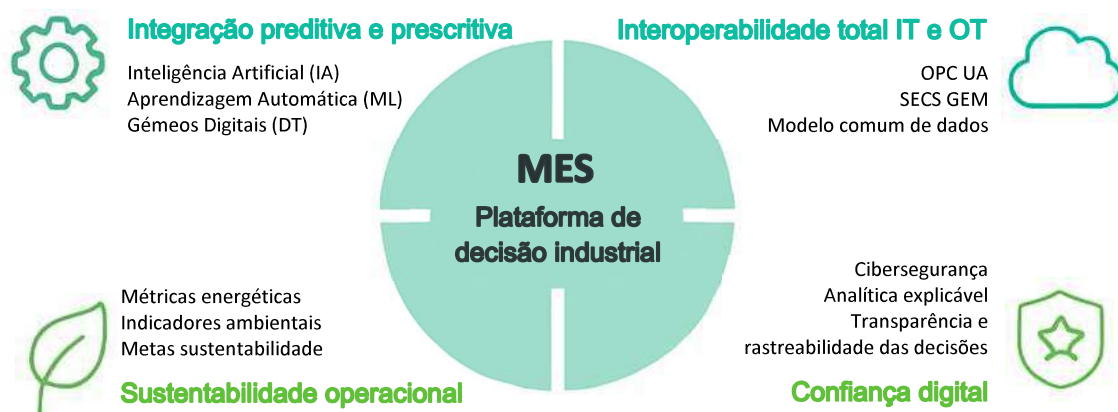


Figura 4.1 - Síntese interpretativa da evolução e tendências do MES (fonte própria).

4.5. Síntese crítica do estado da arte do MES

A revisão sistemática realizada demonstra que o MES, atingiu um nível de maturidade tecnológica e científica robusto, refletido na diversidade de domínios de aplicação e no aumento consistente da produção científica. Apesar deste avanço, a integração completa entre os sistemas de informação empresariais e os sistemas operacionais permanece condicionada por obstáculos de natureza técnica, organizacional e cultural [68][118].

As principais limitações identificadas na literatura incluem a qualidade irregular dos dados recolhidos no chão de fábrica [68], a inexistência de modelos comuns de informação [118] e a heterogeneidade das infraestruturas digitais que suportam processos produtivos complexos [109][113]. A assimetria na adoção de tecnologias avançadas representa outra barreira significativa [39][84]. Evidência empírica recente confirma que a implementação de AI, ML e DT permanece desigual entre setores industriais, sendo mais lenta em organizações com baixa maturidade digital e capacidades reduzidas de integração tecnológica [46][67]. Estudos de referência mostram que a adoção destas tecnologias depende da existência de infraestruturas de dados adequadas, da disponibilidade de sensores fiáveis e da qualificação dos recursos humanos [46][39][84]. A ausência destes elementos cria disparidades setoriais que dificultam a consolidação de estratégias avançadas de fabrico inteligente [39][84]. Os resultados obtidos contribuem de forma significativa para o avanço do conhecimento no domínio da engenharia industrial. A evidência sintetizada confirma que o MES ultrapassou o papel tradicional de sistema de execução e se consolidou como plataforma de decisão industrial capaz de articular dados, processos e ações em tempo quase real. Este reposicionamento conceptual é coerente com a evolução histórica da I4.0 e justifica o crescimento contínuo das publicações observadas desde 2016.

A análise dos casos industriais mostrou melhorias expressivas nos indicadores de desempenho operacional, nomeadamente OEE, no *lead time*, no WIP e na qualidade, resultantes de maior visibilidade e sincronização entre planeamento e operação [68][41][32]. Este estudo distingue-se de revisões anteriores por conjugar análise bibliométrica, análise de conteúdo sistemática e evidência proveniente de 109 artigos. Esta integração metodológica permite uma compreensão transversal do MES em termos históricos, tecnológicos e funcionais. A principal contribuição diferenciadora reside na capacidade de relacionar tendências científicas com resultados operacionais reais, demonstrando que a evolução do MES acompanha a maturação das tecnologias digitais e reforça o seu papel como núcleo coordenador da produção inteligente.

O futuro desenvolvimento deste sistema dependerá da expansão de arquiteturas digitais abertas, da gestão responsável dos dados e do reforço da confiança nas decisões automatizadas, elementos determinantes para a consolidação de ecossistemas de produção inteligentes sustentáveis, interoperáveis e resilientes.

Capítulo 5

Conclusões

Este capítulo consolida a interpretação global dos resultados da dissertação, evidenciando a evolução do MES como plataforma central da coordenação da decisão operacional. A análise dos 109 artigos confirma o papel estrutural do MES na integração entre sistemas empresariais e o chão de fábrica. Os casos industriais demonstram ganhos consistentes em eficiência global do equipamento, *lead time*, WIP, qualidade e desempenho energético, resultantes do fecho do ciclo entre dados, decisão e execução. A integração com tecnologias da I4.0 reforça a capacidade de resposta operacional. Identificam-se limitações associadas à fragmentação da evidência, à reduzida profundidade da dimensão da segurança e à escassez de descrições técnicas das arquiteturas. Definem-se orientações claras para a prática industrial e para a investigação futura.

5.1. Síntese interpretativa dos resultados e contributos do estudo

O presente subcapítulo consolida a interpretação global dos resultados à luz dos objetivos definidos na introdução e das três questões de investigação que orientaram a dissertação. Os resultados obtidos demonstram que o MES evoluiu de um sistema orientado essencialmente para o registo local de dados e controlo da execução para uma plataforma central de coordenação da decisão operacional em ambientes industriais digitalizados. A análise integrada do corpus de 109 artigos e dos casos estudados evidencia que o MES ocupa atualmente uma posição estrutural entre os sistemas empresariais e os equipamentos de chão de fábrica, assegurando a integração de fontes de dados diversas, a visibilidade operacional em tempo quase real e o suporte sistemático à decisão de curto prazo [4] [6] [92] [77] [105][64].

A trajetória identificada ao longo das últimas décadas confirma que o MES não constitui uma tecnologia transitória. Pelo contrário, emerge como elemento estruturante das arquiteturas digitais industriais, acompanhando a crescente complexidade dos sistemas produtivos, a intensificação da integração vertical e a necessidade de alinhar informação operacional e de gestão em tempo operacional. Esta interpretação é consistente com estudos que posicionam o MES como núcleo funcional da ligação entre planeamento e execução e como evolução natural de sistemas anteriores de planeamento de recursos [2] [4] [6] [13] [105].

Relativamente à primeira questão de investigação, centrada na evolução do MES no contexto das sucessivas revoluções industriais, os resultados mostram que nas fases iniciais de informatização da produção o sistema estava principalmente associado à automatização do registo de dados, ao acompanhamento de ordens de fabrico e ao controlo localizado da execução. Com a consolidação dos princípios da I4.0 observa-se uma transformação estrutural, passando o MES a assumir funções alargadas de integração vertical da informação, de sincronização entre níveis operativo e tático e de apoio contínuo à decisão operacional. A crescente associação do MES a conceitos como interoperabilidade, manufatura inteligente e CPS observada nas análises bibliométricas e na evolução das palavras-chave confirma esta transição paradigmática [92] [77] [79] [66] [81] [69] [112] [105] [64].

No que respeita à segunda questão de investigação, focada na implementação e nos impactos operacionais, os casos industriais analisados demonstram que o valor gerado pelo MES é significativo quando este é concebido como plataforma de articulação entre sistemas empresariais, automação industrial e serviços de análise de dados. A síntese quantitativa dos 40 casos industriais mostra melhorias consistentes em indicadores como eficiência global do equipamento, *lead time*, WIP, FPY e desempenho energético. Observam-se melhorias típicas de 10 a 20% na eficiência global do equipamento, reduções de 10 a 30% no *lead time* e no WIP e diminuições entre 5 e 25% em refugos e consumos energéticos específicos, ainda que com

variação entre setores e configurações produtivas [29] [31] [32] [33] [34] [35] [37] [39] [40] [43] [44] [45] [46].

Estes ganhos não resultam apenas da informatização dos registos de produção. Resultam sobretudo da capacidade do sistema para fechar o ciclo entre recolha de dados, apoio à decisão e execução sincronizada. Os casos industriais confirmam que o MES atua como sistema coordenador da operação, com capacidade de análise de dados analítica operacional, quando fecha o ciclo de decisão recolhendo dados, aplicando regras e analítica e concretizando ações no ponto de execução. A diminuição da *lead time* e do WIP é suportada por mecanismos como lançamento e sequenciação de ordens, bloqueios, libertações e replaneamento baseado em eventos de produção [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [42] [46].

A análise aprofundada dos casos industriais revelou se particularmente relevante por estes representarem o nível mais elevado de maturidade tecnológica e organizacional. Para que uma solução atinja este nível é necessário que tenha passado previamente por fases de estudo conceptual, definição de arquitetura e validação em contexto real. A Tabela 3.2 mostra que os casos industriais constituem cerca de 37% dos artigos e concentram a evidência mais robusta de impacto operacional, ao passo que os estudos de arquitetura e os casos reais contribuem sobretudo para a definição de modelos e para a validação em ambientes controlados.

No domínio da integração tecnológica, associado à terceira questão de investigação, os resultados mostram uma convergência clara do desenvolvimento do MES para arquiteturas de decisão mais inteligentes, distribuídas e orientadas por dados. A Figura 3.18 evidencia uma integração progressiva do MES com a IoT e Auto-ID, BD, serviços *Cloud*, CPS, DT, AI e ML. Esta evolução acompanha a passagem de soluções centradas na captação e normalização de dados para arquiteturas nas quais o MES coordena ações no chão de fábrica apoiadas em analítica preditiva e prescritiva [41] [33] [42] [46] [49] [47] [43] [40] [54] [55] [36] [59] [62] [63].

A integração tecnológica traduz se em ganhos operacionais e estratégicos relevantes. Regista se aumento da visibilidade operacional em tempo quase real, melhoria da rastreabilidade ponta a ponta, redução do *lead time*, melhoria sustentada do OEE, diminuição do WIP e de refugos e otimização do consumo energético. Estudos que combinam MES com plataformas de simulação, DT e métodos de AI e ML documentam ganhos conjuntos em OEE, *lead time* e desempenho energético, bem como melhorias na capacidade de antecipar falhas e apoiar o replaneamento da produção com base em previsões [116] [73] [29] [32] [43] [44] [45] [59] [62] [63] [49] [72] [38] [74] [75].

Do ponto de vista científico, a dissertação contribui para a sistematização do conhecimento sobre o MES ao articular de forma estruturada quatro famílias de estudo arquitetura, casos reais, casos industriais e revisões sistemáticas ou bibliométricas. Esta articulação, evidenciada na Tabela 3.2 e nas sínteses do apêndices, produz uma leitura integrada do MES que não se encontra explicitamente estruturada na literatura existente, onde os estudos tendem a enfatizar isoladamente arquiteturas, casos empíricos ou análises bibliométricas. A aplicação combinada do protocolo *PRISMA 2020* com análise bibliométrica e análise de conteúdo constitui um modelo

metodológico replicável para revisões sistemáticas em domínios tecnológicos complexos da engenharia industrial [22] [24] . No plano prático, os resultados oferecem aos decisores industriais um referencial sustentado para a conceção e implementação de soluções MES alinhadas com objetivos de produtividade, qualidade e sustentabilidade, evidenciando a importância da coerência entre arquitetura digital, qualidade dos dados e processos produtivos [29] [70] [95] [71] [58] [116] [103] [96] [73] [67] [97] [44] [87] [104] [117] [119] [120].

5.2. Limitações metodológicas e restrições da evidência disponível

Apesar da robustez da evidência reunida, existem limitações que devem ser reconhecidas para uma correta interpretação dos resultados. A análise empírica realizada neste estudo foi limitada, por opção metodológica, a artigos publicados em revistas científicas indexadas nas bases *Scopus* e *Web of Science* e escritos em língua inglesa. Esta decisão reforça o rigor do processo de seleção e garante que os resultados se baseiam em produção científica validada e sujeita a revisão por pares, mas pode excluir contributos relevantes de literatura técnica, relatórios industriais e estudos não indexados, nomeadamente em pequenas e médias empresas e em contextos geográficos menos representados [22] [23].

A predominância de determinados setores industriais e de certas regiões geográficas pode introduzir enviesamentos na generalização das conclusões. Setores com maior maturidade digital e maior tradição de publicação científica tendem a estar sobre representados, enquanto outros contextos permanecem menos estudados. Esta assimetria implica que os padrões de impacto identificados devam ser interpretados com prudência quando extrapolados para ambientes produtivos com características muito distintas. A aplicação sistemática do protocolo *PRISMA 2020* contribui para mitigar parte destes riscos, assegurando transparência no processo de triagem e confiabilidade na construção do corpus analisado [23]. Verifica-se ainda que a maioria dos estudos analisa implementações do MES de forma isolada, sem explorar de modo sistemático as relações entre diferentes arquiteturas, combinações tecnológicas e níveis de desempenho atingidos. A Tabela 3.2 mostra que os estudos de arquitetura e os casos industriais são frequentemente tratados em linhas de investigação separadas, o que limita a identificação de trajetórias explícitas desde o desenho conceptual até à adoção plena em ambiente fabril. Esta fragmentação dificulta a construção de modelos prescritivos que relacionem decisões de conceção e agregação tecnológica com ganhos operacionais observados.

A dimensão da segurança dos sistemas revela-se ainda insuficientemente desenvolvida na literatura analisada. Embora sejam descritas funcionalidades como a monitorização do estado das máquinas, a visibilidade da produção em tempo quase real e a utilização de painéis de controlo operacionais, são raras as evidências que apresentem de forma detalhada modelos de

proteção de dados, mecanismos de gestão de acessos, segmentação de redes industriais ou princípios estruturados de segurança por desenho nas arquiteturas do MES. Alguns estudos reconhecem explicitamente a vulnerabilidade a ciberameaças e a necessidade de mecanismos robustos de segurança em ambientes conectados, bem como de uma gestão responsável dos dados em soluções suportadas por serviços *Cloud*, mas tratam estes aspetos de forma parcial e muitas vezes apenas como limitação ou linha de trabalho futuro [14] [43] [44] [45] [59] [62]. Consta-se igualmente uma escassez de descrições técnicas suficientemente detalhadas das arquiteturas de implementação e do funcionamento dos painéis de controlo. As arquiteturas são frequentemente apresentadas a um nível elevado de abstração, sem explicitação completa dos fluxos de dados, das camadas funcionais e dos mecanismos de atualização dos indicadores em tempo operacional. Esta limitação reduz a reprodutibilidade das soluções propostas e dificulta a sua transferência para outros contextos industriais, sobretudo em ambientes com recursos técnicos limitados [41] [33] [42] [46] [50] [65].

Em síntese, as limitações identificadas não invalidam as conclusões do estudo, mas definem o perímetro da evidência disponível e sublinham a necessidade de aprofundar a pesquisa em segurança, maturidade digital setorial e trajetórias integradas de adoção do MES em diferentes contextos industriais.

5.3. Orientações para investigação futura e desenvolvimento tecnológico

As limitações identificadas abrem oportunidades claras para o desenvolvimento de investigações futuras orientadas para o reforço da base científica e da aplicabilidade prática do MES. Os resultados desta dissertação mostram que, embora cerca de 40 estudos configurem casos industriais com implementação efetiva, uma parte significativa do corpus permanece focada em propostas de arquitetura conceptual ou em validações em ambiente simulado. Torna-se assim pertinente desenvolver trabalhos que liguem explicitamente estes diferentes níveis de maturidade tecnológica, articulando revisão de literatura, estudos de arquitetura, casos reais e casos industriais completos.

Uma primeira linha de investigação futura consiste em conceber estudos que integrem, de forma explícita, o percurso desde a definição da arquitetura do MES, até à obtenção de ganhos operacionais quantificados. Esta integração deverá relacionar decisões de desenho de arquitetura, escolhas de tecnologias de suporte, sequências de adoção e resultados observados em indicadores como OEE, *lead time*, WIP, FPY e métricas energéticas. A consolidação de padrões de combinação tecnológica e de percursos de adoção faseada poderá apoiar o desenvolvimento de modelos prescritivos para diferentes tipos de processo e níveis de maturidade digital [29] [31] [32] [33] [34] [37] [39] [40] [44] [45] [46].

Uma segunda linha prioritária diz respeito à realização de estudos experimentais e longitudinais em contexto industrial, com recolha de dados primários e acompanhamento da evolução do desempenho após a implementação do MES. Estudos com desenho quase experimental, antes e depois da implementação, em setores distintos e com diferentes níveis de maturidade lean, podem contribuir para clarificar em que condições o MES maximiza os ganhos de produtividade, qualidade e sustentabilidade e como se articula com outras práticas de gestão e tecnologias digitais [29] [70] [95] [71] [58] [116] [103] [96] [73] [67] [97] [44] [87] [104] [117] [119] [120].

A dimensão da segurança deve assumir um papel central na investigação futura sobre o MES. É necessária a integração explícita de mecanismos de proteção de dados, gestão de acessos, segmentação de redes industriais e princípios de segurança por desenho nas arquiteturas propostas, bem como a avaliação do impacto destas soluções na fiabilidade e na continuidade operacional dos sistemas produtivos. Estudos que documentem de forma detalhada perfis de utilizador, políticas de autenticação, modelos de segregação entre redes de tecnologias de informação e redes de tecnologias operacionais e mecanismos de deteção e mitigação de ciberameaças poderão aumentar de forma decisiva a confiança na adoção de soluções MES em ambientes industriais críticos [14] [59] [62] [114] [115].

Finalmente, a formalização detalhada das arquiteturas de MES e do funcionamento dos painéis de controlo constitui outra linha prioritária de investigação. A explicitação sistemática de fluxos de dados, camadas funcionais, lógicas de atualização dos indicadores e mecanismos de apoio à decisão permitirá aumentar a reprodutibilidade das soluções propostas e reforçar a sua transferência para a prática industrial. Em particular, a integração entre MES, DT e métodos de AI e ML abre espaço para arquiteturas em que o sistema coordena dados, modelos e execução, suportando decisões preditivas e prescritivas em tempo quase real [116] [73] [59] [62] [63] [49] [72] [38] [74] [75]. Estas orientações reforçam o papel do MES como plataforma central da decisão operacional na I4.0 e abrem caminho ao desenvolvimento de sistemas de produção cada vez mais inteligentes, seguros e sustentáveis.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Dieguez and J. Machado, "Reviewing Manufacturing Execution System in Industry 4.0: A Global Approach," *EAI Endorsed Transactions on Digital Transformation of Industrial Processes*, vol. 1, no. 3, pp. 1–9, 2025.
- [2] S. Mantravadi and C. Møller, "An overview of next-generation manufacturing execution systems: How important is MES for industry 4.0?," *Procedia Manuf*, vol. 30, no. January, pp. 588–595, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.083.
- [3] S. Jaskó, A. Skrop, T. Holczinger, T. Chován, and J. Abonyi, "Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools," *Comput Ind*, vol. 123, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103300.
- [4] A. Shojaeinasab *et al.*, "Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review," *J Manuf Syst*, vol. 62, no. September 2021, pp. 503–522, 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.01.004.
- [5] E. Arica and D. J. Powell, "Status and future of manufacturing execution systems," *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 2000–2004, 2017, doi: 10.1109/IEEM.2017.8290242.
- [6] F. Almada-Lobo, "The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES)," *Journal of Innovation Management*, vol. 3, no. 4, pp. 16–21, 2015, doi: 10.24840/2183-0606_003.004_0003.
- [7] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, and M. Rosenberg, "How-Virtualization-Decentralization-and-Network-Building-5Ar9T3X2Sq," *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Information and Communication Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 37–44, 2014.
- [8] Y. Yin, K. E. Steckel, and D. Li, "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 1–2, pp. 848–861, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1403664.
- [9] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, and S. A. Gawankar, "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 408–425, 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.05.009.
- [10] A. A. Wagire, A. P. S. Rathore, and R. Jain, "Analysis and synthesis of Industry 4.0 research landscape: Using latent semantic analysis approach," *Journal of Manufacturing*

- Technology Management*, vol. 31, no. 1, pp. 31–51, 2020, doi: 10.1108/JMTM-10-2018-0349.
- [11] H. Nayernia, H. Bahemia, and S. Papagiannidis, "A systematic review of the implementation of industry 4.0 from the organisational perspective," *Int J Prod Res*, vol. 60, no. 14, pp. 4365–4396, 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.2002964.
 - [12] A. Bianchini, I. Savini, A. Andreoni, M. Morolli, and V. Solfrini, "Manufacturing Execution System Application within Manufacturing Small–Medium Enterprises towards Key Performance Indicators Development and Their Implementation in the Production Line," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 7, 2024, doi: 10.3390/su16072974.
 - [13] Y. Liao, F. Deschamps, E. de F. R. Loures, and L. F. P. Ramos, "Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal," *Int J Prod Res*, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1308576.
 - [14] L. Monostori, "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
 - [15] A. Puthanveetil Madathil, X. Luo, Q. Liu, C. Walker, R. Madarkar, and Y. Qin, "A review of explainable artificial intelligence in smart manufacturing," *Int J Prod Res*, no. June, 2025, doi: 10.1080/00207543.2025.2513574.
 - [16] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, and A. Kusiak, "Data-driven smart manufacturing," *J Manuf Syst*, vol. 48, pp. 157–169, 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006.
 - [17] Z. Shao, W. Li, Y. Tan, and K. Otto, "A systematic energy-aware scheduling framework for manufacturing factories integrated with renewables," *Int J Prod Res*, vol. 62, no. 21, pp. 7644–7659, 2024, doi: 10.1080/00207543.2024.2323067.
 - [18] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, "Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
 - [19] A. Mohamed, K. Abdelqader, and K. Shaalan, "Explainable Artificial Intelligence: A systematic Review of Progress and Challenges," *Intelligent Systems with Applications*, vol. 28, no. August, p. 200595, 2025, doi: 10.1016/j.iswa.2025.200595.
 - [20] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 scenarios," *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. 2016-March, pp. 3928–3937, 2016, doi: 10.1109/HICSS.2016.488.
 - [21] L. F. Villegas, M. Macchi, and A. Polenghi, "Digital Twins in Manufacturing: A Unified Conceptual Framework," *Manuscript submitted for publication*, vol. 60, no. October, 2025.
 - [22] D. Moher *et al.*, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement," *PLoS Med*, vol. 6, no. 7, 2009, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.

- [23] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *Bmj*, vol. 372, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [24] M. J. Page *et al.*, "PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews," *The BMJ*, vol. 372, 2021, doi: 10.1136/bmj.n160.
- [25] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 133, no. March, pp. 285–296, 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- [26] M. Aria and C. Cuccurullo, "bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis," *J Informetr*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [27] H. Mondal, "A Technical Note on Bibliometric Analysis by Biblioshiny and VOSviewer," *Indian Journal of Radiology and Imaging*, 2025, doi: 10.1055/s-0045-1810060.
- [28] I. Zupic and T. Čater, "Bibliometric Methods in Management and Organization," *Organ Res Methods*, vol. 18, no. 3, pp. 429–472, 2015, doi: 10.1177/1094428114562629.
- [29] B. Zwolińska, A. A. Tubis, N. Chamier-Gliszczyński, and M. Kostrzewski, "Personalization of the MES system to the needs of highly variable production," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 22, pp. 1–25, 2020, doi: 10.3390/s20226484.
- [30] M. A. Sellitto and E. J. de Vargas, "A method to align functionalities of a manufacturing execution system with competitive priorities," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 31, no. 2, pp. 353–369, 2020, doi: 10.1108/JMTM-11-2018-0424.
- [31] P. Dobra and J. Jósvali, "Overall Equipment Effectiveness (OEE) Life Cycle at the Automotive Semi-Automatic Assembly Lines," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 19, no. 9, pp. 141–155, 2022, doi: 10.12700/aph.19.9.2022.9.8.
- [32] A. Temel, M. Ayaz, and V. Aygöl, "Digital transformation for improved energy and product efficiency in tire production: a case study," *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 4, 2023, doi: 10.1088/2631-8695/ad0877.
- [33] P. Blanc, I. Demongodin, and P. Castagna, "A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 21, no. 3, pp. 315–330, 2008, doi: 10.1016/j.engappai.2008.01.007.
- [34] Z. Tešić, V. Mitrović, I. Ćosić, and D. Lalić, "Integration of information for manufacturing shop control," *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, vol. 56, no. 3, pp. 1–7, 2010.
- [35] P. Dobra and J. Jósvali, "Overall Equipment Effectiveness-Related Assembly Pattern Catalogue based on Machine Learning," *Manufacturing Technology*, vol. 23, no. 3, pp. 276–283, 2023, doi: 10.21062/mft.2023.036.

- [36] Y. H. Tao, T. P. Hong, and S. I. Sun, "An XML implementation process model for enterprise applications," *Comput Ind*, vol. 55, no. 2, pp. 181–196, 2004, doi: 10.1016/j.compind.2004.02.001.
- [37] S. W. Lee and H. K. Lee, "Data acquisition system of compound semiconductor fabrication," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, no. 12, pp. 2149–2158, 2007, doi: 10.1007/BF03177475.
- [38] M. Gopalakrishnan, M. Subramaniyan, and A. Skoogh, "Data-driven machine criticality assessment—maintenance decision support for increased productivity," *Production Planning and Control*, vol. 33, no. 1, pp. 1–19, 2022, doi: 10.1080/09537287.2020.1817601.
- [39] Q. Dai, R. Zhong, G. Q. Huang, T. Qu, T. Zhang, and T. Y. Luo, "Radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system: A case study in an automotive part manufacturer," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 25, no. 1, pp. 51–65, 2012, doi: 10.1080/0951192X.2011.562546.
- [40] S. Mantravadi, J. S. Srari, and C. Møller, "Application of MES/MOM for Industry 4.0 supply chains: A cross-case analysis," *Comput Ind*, vol. 148, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.compind.2023.103907.
- [41] M. L. Wang, T. Qu, R. Y. Zhong, Q. Y. Dai, X. W. Zhang, and J. B. He, "A radio frequency identification-enabled real-time manufacturing execution system for one-of-a-kind production manufacturing: A case study in mould industry," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 25, no. 1, pp. 20–34, 2012, doi: 10.1080/0951192X.2011.575183.
- [42] D. Berić, D. Stefanović, B. Lalić, and I. Ćosić, "The implementation of ERP and MES Systems as a support to industrial management systems," *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no. 2, pp. 77–86, 2018, doi: 10.24867/ijiem-2018-2-109.
- [43] Q. Li, W. Tang, and Z. Li, "Leveraging Industry 4.0 for Sustainable Manufacturing: A Quantitative Analysis Using FI-RST," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 20, 2024, doi: 10.3390/app14209545.
- [44] C. J. de M. Santos, A. S. Barbosa, and A. M. O. Sant'Anna, "Machine Learning-integrated digital twins for process optimization in Industry 5.0," *J Ind Inf Integr*, vol. 47, no. July, p. 100920, 2025, doi: 10.1016/j.jii.2025.100920.
- [45] S. Răileanu, F. Anton, T. Borangiu, S. Anton, and M. Nicolae, "A cloud-based manufacturing control system with data integration from multiple autonomous agents," *Comput Ind*, vol. 102, pp. 50–61, 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.08.004.
- [46] D. Rodrigues, P. Carvalho, S. Rito Lima, E. Lima, and N. V. Lopes, "An IoT platform for production monitoring in the aerospace manufacturing industry," *J Clean Prod*, vol. 368, no. July, p. 133264, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133264.

- [47] L. Tamas and M. Murar, "Smart CPS: vertical integration overview and user story with a cobot," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 32, no. 4–5, pp. 504–521, 2019, doi: 10.1080/0951192X.2018.1535196.
- [48] J. Nesterak, M. Szelaowski, and P. Radziszewski, "Workplace performance measurement: digitalization of work observation and analysis," *J Intell Manuf*, vol. 36, no. 5, pp. 3569–3585, 2025, doi: 10.1007/s10845-024-02419-x.
- [49] V. M. Tabim, N. F. Ayala, G. A. Marodin, G. B. Benitez, and A. G. Frank, "Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) for Industry 4.0: Overcoming buyer-provider information asymmetries through knowledge sharing dynamics," *Comput Ind Eng*, vol. 196, no. October 2023, 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.110483.
- [50] S. Oman, R. Leskova, B. Rosi, and A. Baggia, "Integration of MES and ERP in supply chains: effect assessment in the case of the automotive industry," *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, vol. 24, no. 6, pp. 1889–1896, Dec. 2017, doi: 10.17559/TV-20160426094449.
- [51] M. Lanzini, I. Ferretti, and S. Zanoni, "Towards the Implementation and Integration of a Digital Twin in a Discrete Manufacturing Context," *Processes*, vol. 12, no. 11, 2024, doi: 10.3390/pr12112384.
- [52] L. P. Pusztai, L. Nagy, and I. Budai, "A Risk Management Framework for Industry 4.0 Environment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/su15021395.
- [53] G. Bruno, A. Faveto, and E. Traini, "An open source framework for the storage and reuse of industrial knowledge through the integration of plm and mes," *Management and Production Engineering Review*, vol. 11, no. 2, pp. 62–73, 2020, doi: 10.24425/mp.2020.133729.
- [54] J. Bernard *et al.*, "Improved Performance Monitoring and Maintenance Processes using new data systems, sensors, and digital modelling in Cold Mill Roll Shop at Tata Steel Ijmuiden," *Metallurgia Italiana*, no. 3, pp. 57–66, 2023.
- [55] A. Molina and A. R. Santaella, "Achieving e-Manufacturing: Multihead control and web technology for the implementation of a manufacturing execution system," *J Intell Manuf*, vol. 17, no. 6, pp. 715–724, 2006, doi: 10.1007/s10845-006-0040-2.
- [56] J. Bernard *et al.*, "Improved Performance Monitoring and Maintenance Processes using new data systems, sensors, and digital modelling in Cold Mill Roll Shop at Tata Steel Ijmuiden," *Metallurgia Italiana*, no. 3, pp. 57–66, 2023.
- [57] D. Rodrigues, P. Carvalho, S. Rito Lima, E. Lima, and N. V. Lopes, "An IoT platform for production monitoring in the aerospace manufacturing industry," *J Clean Prod*, vol. 368, no. July, p. 133264, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133264.

- [58] V. Krueger *et al.*, “A vertical and cyber-physical integration of cognitive robots in manufacturing,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1114–1127, 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2521731.
- [59] T. Raamets, K. Karjust, A. Hermaste, and K. Kelpman, “Virtual factory model development for AI-driven optimization in manufacturing,” *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. 74, no. 2, pp. 228–233, 2025, doi: 10.3176/proc.2025.2.26.
- [60] M. Rolón and E. Martínez, “Agent-based modeling and simulation of an autonomic manufacturing execution system,” *Comput Ind*, vol. 63, no. 1, pp. 53–78, 2012, doi: 10.1016/j.compind.2011.10.005.
- [61] P. Verstraete, P. Valckenaers, B. Saint Germain, H. Van Brussel, and K. Hadeli, “Integration of planning systems and an agent-oriented MES,” *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 8, no. 1–3, pp. 159–174, 2006, doi: 10.1504/ijmtm.2006.008793.
- [62] P. Dobra and J. Jósvali, “Prediction of Overall Equipment Effectiveness in Assembly Processes Using Machine Learning,” *Strojnický Casopis*, vol. 74, no. 2, pp. 57–64, 2024, doi: 10.2478/scjme-2024-0026.
- [63] Z. Yuan, M. Li, C. Liu, F. Han, H. Huang, and H. N. Dai, “Chat with MES: LLM-driven user interface for manipulating garment manufacturing system through natural language,” *J Manuf Syst*, vol. 80, no. February, pp. 1093–1107, 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2025.02.008.
- [64] L. M. Yakovis, “Multi-level production control: Modern state, problems, prospects,” *Automation and Remote Control*, vol. 71, no. 10, pp. 2247–2258, 2010, doi: 10.1134/S0005117910100280.
- [65] A. Tariq, S. A. Khan, W. H. But, A. Javaid, and T. Shehryar, “An IoT-Enabled Real-Time Dynamic Scheduler for Flexible Job Shop Scheduling (FJSS) in an Industry 4.0-Based Manufacturing Execution System (MES 4.0),” *IEEE Access*, vol. 12, no. March, pp. 49653–49666, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3384252.
- [66] R. Beregi, G. Pedone, B. Háy, and J. Váncza, “Manufacturing execution system integration through the standardization of a common service model for cyber-physical production systems,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, 2021, doi: 10.3390/app11167581.
- [67] L. C. Magalhães *et al.*, “Conceiving a Digital Twin for a Flexible Manufacturing System,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3390/app12199864.
- [68] T. Y. Wang and H. C. Pan, “Improving the OEE and UPH data quality by Automated Data Collection for the semiconductor assembly industry,” *Expert Syst Appl*, vol. 38, no. 5, pp. 5764–5773, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.10.056.

- [69] A. A. N. Azian, R. C. Mamat, D. Ibrahim, and F. Abu, "Lean Manufacturing and Industry 4.0: Unveiling Trends, Applications, and Global Impacts in Manufacturing Through Comprehensive Literature Review," *Jurnal Kejuruteraan*, vol. 37, no. 1, pp. 151–165, 2025, doi: 10.17576/jkukm-2025-37(1)-10.
- [70] E. Negri, S. Berardi, L. Fumagalli, and M. Macchi, "MES-integrated digital twin frameworks," *J Manuf Syst*, vol. 56, no. April, pp. 58–71, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.
- [71] P. D. Urbina Coronado, R. Lynn, W. Louhichi, M. Parto, E. Wescoat, and T. Kurfess, "Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system," *J Manuf Syst*, vol. 48, pp. 25–33, 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.02.002.
- [72] F. Zhao, C. Yin, X. Huo, and Y. Xu, "Research on Quality Control Application of Whole Process Intelligent Manufacturing in Steel Industry 4.0 Based on Big Data Analysis," *Journal of Network Intelligence*, vol. 7, no. 3, pp. 685–703, 2022.
- [73] C. Gröger, C. Stach, B. Mitschang, and E. Westkämper, "A mobile dashboard for analytics-based information provisioning on the shop floor," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 29, no. 12, pp. 1335–1354, 2016, doi: 10.1080/0951192X.2016.1187292.
- [74] Y. Xu, Y. Qamsane, S. Puchala, A. Januszczak, D. M. Tilbury, and K. Barton, "A data-driven approach toward a machine- and system-level performance monitoring digital twin for production lines," *Comput Ind*, vol. 157–158, no. December 2023, p. 104086, 2024, doi: 10.1016/j.compind.2024.104086.
- [75] S. Kurmanov, "Importance of the Integrated Manufacturing Execution System for a Metallurgical Enterprise," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 13–120, pp. 52–58, 2022, doi: 10.15587/1729-4061.2022.265378.
- [76] P. J. Rondeau and L. A. Litteral, "Evolution of manufacturing planning and control systems: From reorder point to enterprise resource planning," *Production and Inventory Management Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 1–7, 2001.
- [77] M. Witsch and B. Vogel-Heuser, "Towards a formal specification framework for manufacturing execution systems," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 8, no. 2, pp. 311–320, 2012, doi: 10.1109/TII.2012.2186585.
- [78] W. M. Mohammed *et al.*, "Generic platform for manufacturing execution system functions in knowledge-driven manufacturing systems," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 31, no. 3, pp. 262–274, 2018, doi: 10.1080/0951192X.2017.1407874.
- [79] X. Chen, C. Nophut, and T. Voigt, "A model-driven approach for engineering customizable MES with the application to the food and beverage industry," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 115, no. 7–8, pp. 2607–2622, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07317-7.

- [80] C. Gomes, E. Busanello, B. Padilha, L. V. Lerman, and V. M. Tabim, "Exploring Key Factors for Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) within the Framework of Industry 4.0 for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) in the Manufacturing Sector," *Production*, vol. 34, no. 2021, 2024, doi: 10.1590/0103-6513.20230085.
- [81] A. Moeuf, R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo, and R. Barbaray, "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 3, pp. 1118–1136, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1372647.
- [82] M. Rao, L. Lynch, J. Coady, D. Toal, and T. Newe, "Integration of an mes and aiv using a labview middleware scheduler suitable for use in industry 4.0 applications," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 20, pp. 1–25, 2020, doi: 10.3390/app10207054.
- [83] K. Poka, S. Ali, W. Saeed, B. Merz, M. Epperlein, and K. Hilgenberg, "Design and implementation of a machine log for PBF-LB/M on basis of IoT communication architectures and an ETL pipeline," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 9, no. 3, pp. 643–654, 2024, doi: 10.1007/s40964-024-00660-7.
- [84] S. S. Choi and G. Kang, "Towards development of cyber-physical systems based on integration of heterogeneous technologies," *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 129–136, 2018, doi: 10.1504/IJCAT.2018.094567.
- [85] C. T. Y. Züge, S. L. Pereira, and E. M. Dias, "Integration of information technology and automation: Facilitators and barriers," *WSEAS Transactions on Systems and Control*, vol. 5, no. 5, pp. 372–381, 2010.
- [86] S. Sekkat, K. Kouiss, J. Saadi, and L. Deshayes, "Developing integrated performance measurement system using component based approach," *International Journal of Computers, Communications and Control*, vol. 8, no. 2, pp. 294–303, 2013, doi: 10.15837/ijccc.2013.2.309.
- [87] T. M. Fernández-Caramés, P. Fraga-Lamas, M. Suárez-Albela, and M. A. Díaz-Bouza, "A fog computing based cyber-physical system for the automation of pipe-related tasks in the industry 4.0 shipyard," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 6, 2018, doi: 10.3390/s18061961.
- [88] M. Subramaniyan, A. Skoogh, H. Salomonsson, P. Bangalore, M. Gopalakrishnan, and A. Sheikh Muhammad, "Data-driven algorithm for throughput bottleneck analysis of production systems," *Prod Manuf Res*, vol. 6, no. 1, pp. 225–246, 2018, doi: 10.1080/21693277.2018.1496491.
- [89] J. M. Simão, P. C. Stadzisz, and G. Morel, "Manufacturing execution systems for customized production," *J Mater Process Technol*, vol. 179, no. 1–3, pp. 268–275, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.064.

- [90] P. Valckenaers, H. Van Brussel, P. Verstraete, B. Saint Germain, and Hadeli, "Schedule execution in autonomic manufacturing execution systems," *J Manuf Syst*, vol. 26, no. 2, pp. 75–84, 2007, doi: 10.1016/j.jmsy.2007.12.003.
- [91] Z. Wu *et al.*, "Investigation of the customized furniture industry's production management systems," *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, vol. 11, pp. 164–175, 2023, doi: 10.1016/j.jer.2023.100072.
- [92] R. Rozs and M. Ando, "Collaborative systems, operation and task of the manufacturing execution systems in the 21st century industry," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 51–66, 2020, doi: 10.3311/PPme.14413.
- [93] M. Ko, C. Lee, and Y. Cho, "Design and Implementation of Cloud-Based Collaborative Manufacturing Execution System in the Korean Fashion Industry," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 18, 2022, doi: 10.3390/app12189381.
- [94] N. N. Bakhtadze, "Virtual analyzers: Identification approach," *Automation and Remote Control*, vol. 65, no. 11, pp. 1691–1709, 2004, doi: 10.1023/B:AURC.0000047885.52816.c7.
- [95] B. S. De Ugarte, A. Hajji, R. Pellerin, and A. Artiba, "Engineering change order processing in ERP systems: An integrated reactive model," *European Journal of Industrial Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 394–412, 2010, doi: 10.1504/EJIE.2010.035651.
- [96] W. Qingfeng, L. Wenbin, Z. Xin, Y. Jianfeng, and Y. Qingbin, "Development and application of equipment maintenance and safety integrity management system," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 24, no. 4, pp. 321–332, 2011, doi: 10.1016/j.jlp.2011.01.008.
- [97] J. Kim, D. Seo, J. Moon, J. Kim, H. Kim, and J. Jeong, *Design and Implementation of an HCPS-Based PCB Smart Factory System for Next-Generation Intelligent Manufacturing*, vol. 12, no. 15, 2022, doi: 10.3390/app12157645.
- [98] A. N. Feofanov, M. A. Shutikov, and K. S. Ponomarev, "Electronic Document Management in Production Systems," *Russian Engineering Research*, vol. 38, no. 12, pp. 974–978, 2018, doi: 10.3103/S1068798X18120055.
- [99] Y. Fu and P. Jiang, "RFID based e-quality tracking in service-oriented manufacturing execution system," *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 25, no. 5, pp. 974–981, 2012, doi: 10.3901/CJME.2012.05.974.
- [100] A. Schumann, "SAP-R/3 in process industries: Expectations, experiences and outlooks," *ISA Trans*, vol. 36, no. 3, pp. 161–166, 1997, doi: 10.1016/S0019-0578(97)82046-0.
- [101] R. Y. Zhong, Q. Y. Dai, T. Qu, G. J. Hu, and G. Q. Huang, "RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 29, no. 2, pp. 283–292, 2013, doi: 10.1016/j.rcim.2012.08.001.

- [102] X. Ye, M. Yu, W. S. Song, and S. H. Hong, "An Asset Administration Shell Method for Data Exchange Between Manufacturing Software Applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 144171–144178, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3122175.
- [103] G. Caiza and R. Sanz, "An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, 2024, doi: 10.3390/app14104125.
- [104] A. Aramja, O. Kamach, and R. Elmezziane, "Companies' perception toward manufacturing execution systems," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 3347–3355, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp3347-3355.
- [105] A. Bratukhin and T. Sauter, "Functional analysis of manufacturing execution system distribution," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 7, no. 4, pp. 740–749, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2167155.
- [106] T. Lojka, M. Bundzel, and I. Zolotová, "Service-oriented architecture and cloud manufacturing," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 13, no. 6, pp. 25–44, 2016, doi: 10.12700/aph.13.6.2016.6.2.
- [107] F. El Kalach, J. Solanki, and A. Todkar, "A federated information system framework for vertical integration," *Manuf Lett*, vol. 41, pp. 1192–1199, 2024, doi: 10.1016/j.mfglet.2024.09.145.
- [108] B. H. Zhou, S. J. Wang, and L. F. Xi, "Data model design for manufacturing execution system," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 16, no. 8, pp. 909–935, 2005, doi: 10.1108/17410380510627889.
- [109] Z. Yang, W. Xu, P. K. Wong, and X. Wang, "Modeling of RFID-enabled real-time manufacturing execution system in mixed-model assembly lines," *Math Probl Eng*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/575402.
- [110] A. Blaga, C. Militaru, A. D. Mezei, and L. Tamas, "Augmented reality integration into MES for connected workers," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 68, no. August 2020, p. 102057, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102057.
- [111] S. Mantravadi, R. Schnyder, C. Møller, and T. D. Brunoe, "Securing IT/oT links for low power IIoT devices: Design considerations for industry 4.0," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200305–200321, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035963.
- [112] X. Chen, F. Gemein, S. Flad, and T. Voigt, "Basis for the model-driven engineering of manufacturing execution systems: Modeling elements in the domain of beer brewing," *Comput Ind*, vol. 101, no. June, pp. 127–137, 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.07.005.
- [113] L. C. Wang, C. C. Chen, J. L. Liu, and P. C. Chu, "Framework and deployment of a cloud-based advanced planning and scheduling system," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 70, no. September 2019, p. 102088, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.102088.

- [114] L. A. C. Ahakonye, A. Zainudin, M. J. A. Shanto, J. M. Lee, D. S. Kim, and T. Jun, "A multi-MLP prediction for inventory management in manufacturing execution system," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 26, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101156.
- [115] K. F. Becker *et al.*, "Implementation of Trusted Manufacturing & AI-based Process Optimization into Microelectronic Manufacturing Research Environments," *Advancing Microelectronics*, vol. 49, no. 4, pp. 6–10, 2022, doi: 10.4071/1085-8024-2021.1.
- [116] F. T. Cheng, J. Y. C. Chang, H. C. Huang, C. A. Kao, Y. L. Chen, and J. L. Peng, "Benefit model of virtual metrology and integrating AVM into MES," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 24, no. 2, pp. 261–272, 2011, doi: 10.1109/TSM.2011.2104372.
- [117] K. Daniewski, E. Kosicka, and D. Mazurkiewicz, "Analysis of the correctness of determination of the effectiveness of maintenance service actions," *Management and Production Engineering Review*, vol. 9, no. 2, pp. 20–25, 2018, doi: 10.24425/119522.
- [118] E. L. Itskovich, "Basics of MES construction concept for production industries," *Automation and Remote Control*, vol. 77, no. 11, pp. 2035–2043, 2016, doi: 10.1134/S0005117916110126.
- [119] N. Bayar, S. Darmoul, S. Hajri-Gabouj, and H. Pierreval, "Using immune designed ontologies to monitor disruptions in manufacturing systems," *Comput Ind*, vol. 81, pp. 67–81, 2016, doi: 10.1016/j.compind.2015.09.004.
- [120] A. Banerjee, N. Bommu, P. Agarwal, and N. Jaisankar, "Design of manufacturing execution system for FMCG industries," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 2366–2374, 2013.

Apêndice I

Tabela de Análise Técnico-Científica dos Artigos MES

Título	Autores	Ano	Tipo de estudo	Objectivo no estudo	Sector industrial	Qual o papel do MES?	Vantagens do MES	Desvantagens do MES	Mecanismos dominantes de impacto
Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems	Richard Rozs; Matyas Ando	2020	Arquitetura	Fornecer uma visão abrangente da estrutura, operação e tarefas do MES, clarificando a sua posição intermédia entre ERP e chão-de-fábrica. O artigo sintetiza sistemas colaborativos e ferramentas complementares (SCADA/SCT/DES, MBSE/SysML, CPMS/MIB, NCS), mostrando os seus contributos para a integração vertical e horizontal, a execução em tempo real, a cibersegurança e a melhoria da eficiência produtiva.	Multisectorial - exemplos em siderurgia, indústria aeronáutica, intralogística com AGV e células robotizadas.	Sistema intermédio entre ERP e o chão-de-fábrica, responsável pela recolha e tratamento de dados, rastreabilidade, qualidade e execução orquestrada. Assegura a integração vertical/horizontal e transforma o planeamento em acções executáveis. É reforçado por SCADA/SCT/DES e complementado por SS/CP, HMES/PROSA e CPMS/MIB, aumentando visibilidade e resposta operacional.	- Melhoria da eficiência e estabilidade. - Monitorização em tempo real. - Redução de perdas (lean+MES). - Melhor desempenho de robótica colaborativa. - Optimização de fluxos de materiais e energia.	- Investimento inicial elevado e necessidade de formação. - Interfaces complexas ERP-MES-SCADA. - Dados em tempo real. - Escalonamento SS/CP. - Flexibilidade HMES/PROSA. - Arquitetura CPMS/MIB.K3 - Conectividade NCS. - Aplicação de princípios lean suportados por sensorização.	- Integração vertical ERP-MES-SCADA.
				O MES atua como núcleo de informação e coordenação, conectando, monitorizando e controlando os fluxos de dados no chão de fábrica em tempo real. Serve de ponte entre sistemas de gestão (ERP) e equipamentos, definindo as sequências de recolha e entrega que orientam o AIV. No sistema proposto, o MES desencadeia as ordens de transporte e recebe as confirmações automáticas do AIV, garantindo rastreabilidade e execução sincronizada das operações produtivas.	- Integração com AIVs. - Comunicação em tempo real. - Automatização logística. - Redução da intervenção humana. - Rastreabilidade completa. - Aumento da eficiência e flexibilidade. - Compatibilidade com sistemas SAP. - Suporte à produção inteligente.	- Necessidade de middleware dedicado. - Dependência de infraestrutura de comunicação estável. - Complexidade de integração inicial. - Comunicação em tempo real via web services e ROS - Controle autónomo de transporte. - Redução de tempos de ciclo. - Necessidade de intervenção manual em falhas.			
Integration of an MES and AIV Using a LabVIEW Middleware Scheduler Suitable for Use in Industry 4.0 Applications	Muzaffar Rao; Liam Lynch; James Coady; Daniel Toali; Thomas Newe	2020	Arquitetura	Propor e validar um agendador baseado em LabVIEW que funcione como middleware entre um Sistema de Execução da Produção (MES) e um Veículo Inteligente Autónomo (AIV) de baixo custo, construído com ROS. O objetivo é assegurar a comunicação bidirecional entre ambos os sistemas, permitindo o transporte automático de produtos entre células de produção, com redução da intervenção humana, aumento da eficiência operacional e suporte à visão da Indústria 4.0.	Ambiente de fabrico baseado em células, aplicável à indústria transformadora (automóvel, eletrónica, integração logística).	O MES atua como núcleo de informação e coordenação, conectando, monitorizando e controlando os fluxos de dados no chão de fábrica em tempo real. Serve de ponte entre sistemas de gestão (ERP) e equipamentos, definindo as sequências de recolha e entrega que orientam o AIV. No sistema proposto, o MES desencadeia as ordens de transporte e recebe as confirmações automáticas do AIV, garantindo rastreabilidade e execução sincronizada das operações produtivas.	- Integração com AIVs. - Comunicação em tempo real. - Automatização logística. - Redução da intervenção humana. - Rastreabilidade completa. - Aumento da eficiência e flexibilidade. - Compatibilidade com sistemas SAP. - Suporte à produção inteligente.	- Necessidade de middleware dedicado. - Dependência de infraestrutura de comunicação estável. - Complexidade de integração inicial. - Comunicação em tempo real via web services e ROS - Controle autónomo de transporte. - Redução de tempos de ciclo. - Necessidade de intervenção manual em falhas.	- Integração MES-AIV. - Middleware LabVIEW. - Comunicação em tempo real - Comunicação em tempo real via web services e ROS - Controle autónomo de transporte. - Redução de tempos de ciclo.
Generic platform for manufacturing execution system functions in knowledge-driven manufacturing systems	Vlael M. Mohammed; Borja Ramis Ferrer; Sergii Iarovy; Elisa Negri; Luca Fumagalli; Andrei Lobov; Jose L. Martinez Lasra	2018	Arquitetura	Apresentar uma arquitetura flexível e reconfigurável para implementar funções de um Sistema de Execução da Produção (MES) em ambientes de fabrico orientados pelo conhecimento. A solução combina sistemas baseados em conhecimento com serviços web RESTful, permitindo que as funções MES sejam tratadas como serviços interoperáveis, independentes do provedor e facilmente configuráveis. O objetivo é aumentar a flexibilidade, a modularidade e a independência tecnológica dos sistemas de produção, reduzindo custos e esforço de reconfiguração.	Indústria discreta (linha de montagem FASTory, Tampere University of Technology, Finlândia).	O MES é o núcleo funcional que liga o chão de fábrica aos sistemas de gestão, permitindo o controlo e a monitorização em tempo real. Na arquitetura proposta, o MES é composto por funções encapsuladas em serviços semânticos, geridas por uma base de conhecimento ontológica (KBS). Atua como mediador entre os dispositivos físicos (IoT) e as camadas de orquestração e visualização, garantindo interoperabilidade, descoberta automática e execução de processos de produção flexíveis.	- Elevada reconfigurabilidade e modularidade. - Independência de fornecedor. - Interoperabilidade via semântica e serviços RESTful. - Configuração fácil com IoT. - Integração com IoT. - Suporte à automação distribuída. - Reutilização de funções MES. - Redução de custos e tempos de implementação.	- Necessidade de maior capacidade computacional. - Sobre carga de comunicação. - Complexidade acrescida de configuração. - Vulnerabilidades de segurança devido à utilização da web. - Ligação entre camadas física, semântica e de orquestração. - Execução em Node.js. - Prova de conceito em linha real de montagem (FASTory).	- Encapsulamento de funções MES em serviços semânticos RESTful. - Modelo ontológico para gestão de conhecimento. - Integração com arquitetura OKD-MES.

<i>Augmented reality integration into MES for connected workers</i>	Apresentar a integração da Realidade Aumentada (RA) em Sistemas de Execução da Produção (MES) para apoiar trabalhadores conectados e melhorar a colaboração homem-robô. O estudo propõe e valida arquiteturas baseadas em dispositivos RA (HoloLens, ARCore, Google Tango e Epson Moverio) para tarefas de montagem, visualização e monitorização industrial, analisando metodologias de calibração e comunicação ROS. O objetivo central é aumentar a segurança, reduzir tempos de montagem e otimizar o desempenho produtivo em ambientes inteligentes de Indústria 4.0.	Indústria de montagem e manufatura inteligente (contextos de colaboração homem-robô)	O MES atua como núcleo de integração entre dispositivos de RA, robôs colaborativos (cobots), AGVs e sistemas PLM/ERP, coordenando dados de produção, sequências de montagem e monitorização em tempo real. Serve de elo sensório e operacional que fornece dados à RA e recebe feedback dos trabalhadores e robôs, assegurando rastreabilidade e execução eficiente das operações.	- Melhoria da percepção 3D dos operadores. - Redução do tempo de montagem. - Melhor segurança e colaboração intuitiva. - Integração fluida de dados entre sistemas ROS, PLM, ERP e RA. - Necessidade de calibração complexa entre sistemas. - Elevada dependência de hardware especializado (HMDs, sensores). - Risco de imprecisão em ambientes com iluminação variável. - Integração RA-MES-Robótica → aumento de produtividade, segurança e eficiência cognitiva dos operadores.
	Andreea Blaga; Cristian Militaru; Adv- Daniel Mezei; Levente Tamas 2021 Arquitetura			
<i>Design and Implementation of Cloud-Based Collaborative Manufacturing Execution System in the Korean Fashion Industry</i>	Minjae Ko; Changho Lee; Yongju Cho 2022 Arquitetura	Indústria da moda (vestuário desportivo) - PMEs de design, tecidos, estampagem e costura, em rede colaborativa na Coreia.	Camada central de integração e orquestração entre ERP, chão de fábrica e parceiros externos. Gere ordens de trabalho digitais, rastreabilidade por QR/visão, WIP, defeitos e estados de processo; recolhe dados de sensores e máquinas via gateway IoT; disponibiliza painéis em tempo real e aplicações móveis; e suporta colaboração entre várias empresas ao longo da cadeia de valor, com integração de vendas/ERP e gestão de empresas colaboradoras.	- Dependência de conectividade e serviços em nuvem. - Rastreabilidade de ponta-a-ponta, visibilidade em tempo real. - Redução de papelerismos. - Colaboração interempresarial. - Integração ERP/IoT. - Mobilidade (apps Android). - Reconfigurabilidade para PMEs. - Base para KPIs e melhoria contínua. - Integração ERP-MES. - Funções analíticas avançadas ainda incipientes. - Plataforma cloud colaborativa. - Rastreabilidade por QR + visão. - Gateway IoT para dados de máquina/ambiente. - Apps móveis para registo no posto. - Necessidade de normalização e segurança. - Painéis de monitorização em tempo real.
<i>Towards the encapsulation and decentralisation of OKD-MES services within embedded devices</i>	Borja Ramis Ferrer; Jose Luis Martinez Lastra 2017 Arquitetura	Indústria de fabrico automatizado (contexto genérico de automação industrial e chão de fábrica experimental da Universidade de Tecnologia de Tampere).	O MES, na forma OKD-MES, atua como sistema ciberfísico de coordenação e gestão de conhecimento entre níveis de automação, substituindo parcialmente a arquitetura centralizada por uma rede cooperativa de dispositivos inteligentes. Cada unidade incorpora a sua própria base de conhecimento e executa tarefas de controlo local, interagendo com o MES global. Assim, o sistema integra ontologias, serviços web e dispositivos incorporados, transformando o MES num ecossistema distribuído e cooperativo.	- Descentralização e encapsulamento de serviços. - Maior robustez e resiliência. - Escalabilidade. - Flexibilidade plug-and-play. - Redução da sobrecarga de comunicação vertical. - Interoperabilidade semântica via OWL e SPARQL. - Diminuição do tempo e esforço de configuração. - Possíveis conflitos de conhecimento entre dispositivos. - Dependência de recursos computacionais locais. - Custos de hardware mais elevados. - Maior complexidade de gestão distribuída. - Desempenho inferior em sistemas pequenos. - Encapsulamento do serviço RPL-S. - Descentralização da base de conhecimento (KB). - Comunicação horizontal SPARQL entre dispositivos. - Rede de dispositivos cooperativos, inteligentes. - Ontologias OWL. - Arquitetura SOA baseada em conhecimento. - Integração com projeto europeu eScop.

MES-integrated digital twin frameworks	Elisa Negri; Stefano Berardi; Luca Fumagalli; Marco Macchi	2020	Arquitetura	Propor e validar estruturas que transformam uma <i>Digital Shadow</i> em <i>Digital Twin</i> ao integrar um modelo de simulação com o MES, possibilitando comunicação bidirecional entre o ativo físico e o gêmeo digital. Mostrar uma camada de inteligência que decide e aciona, via MES, respostas a eventos de produção. As duas estruturas visam gerir estados de erro e desencadear desmontagem reativa quando a inspeção de qualidade identifica não conformidades, reduzindo tempos de inatividade e evitando operações desnecessárias.	Linha de montagem prototípica (Festo/Mitsubishi/Siemens) com fabrico discreto com transporte RFID e estações automáticas (robô, inspeção por câmara, prensa).	O MES atua como ponte operacional para fechar o ciclo de controlo do DT: recebe decisões da camada de inteligência e executa ações no chão de fábrica (p. ex., limpar estações, abortar ordens, planejar desmontagens), além de fornecer estado em tempo real em DT. A integração é realizada por protocolos M2M/TCPIP e OPC UA, com parsing de comandos/srings no lado MES.	- Ciclo de controlo fechado DT-MES. - Redução de tempos de inatividade. - Replaneamento reativo. - Suporte à decisão automático. - Melhor interação homem-máquina (HCPS). - Execução em tempo real baseada em eventos. - Integração com sensores/estados de máquina.	- Dependência de integração e parsing específico. - Necessidade de regras bem definidas na camada de inteligência. - Variação de desempenho quando exige intervenção humana. - Esforço de modelação/parametrização por estação. - Ativação por estados de disparo (combinações de sensores).	- DT com camada de inteligência. - OPC UA para leitura/sobre-escrita de sensores. - TCP/IP para comandos ao MES. - Gestão de estados de erro (tipo A/B) e desmontagem reativa por qualidade. - Ativação por estados de disparo (combinações de sensores).
A Multi-MLP Prediction for Inventory Management in Manufacturing Execution System	LoveAllen Chijioke Anakonye; Ahmad Zainudin; Md Javed Ahmed Shanto; Jae-Min Lee; Dong-Seong Kim; Taesoo Jun	2023	Arquitetura	Propor um modelo de previsão de inventário em ambiente MES baseado em redes neurais multicamadas (Multi-MLP) combinadas com o algoritmo LightGBM para seleção de características. O objetivo é aumentar a precisão da previsão, reduzir o custo e o tempo de computação e diminuir o erro médio absoluto (MAE) na gestão de inventário de matérias-primas. O modelo é testado com dados públicos de encomendas em atraso e mostra maior fiabilidade e rapidez na tomada de decisão, contribuindo para operações mais inteligentes e sustentáveis nas fábricas conectadas.	Fabrico discreto e gestão de inventário de matérias-primas em linhas MES (aplicação genérica; sem referência a um setor específico).	O MES atua como plataforma de recolha, integração e análise de dados de produção e inventário, suportando decisões de reabastecimento. Facilita a interação entre o chão de fábrica e os sistemas empresariais, permitindo prever falhas de stock e ajustar a produção em tempo real com base nos resultados do modelo Multi-MLP. O MES serve de base operacional para a implementação da inteligência artificial na gestão preditiva do inventário.	- Integração com IA para previsão de inventário. - Decisões em tempo real. - Redução de custos de stock. - Diminuição do erro MAE para 0,2331. - Menor custo de tempo (≈ 24 s). - Melhoría da eficiência de previsão (> 50 % R²). - Otimização da cadeia de abastecimento. - Suporte à produção inteligente.	- Dependência de dados públicos e limitados. - Ausência de aplicação real. - Necessidade de especialistas em IA. - Custos iniciais elevados. - Sensibilidade à qualidade e equilíbrio dos dados.	- Arquitetura Multi-MLP com LightGBM para seleção de características. - Processamento em camadas ReLU e sigmoidal. - Pré-processamento Min-MaxScaler. - Comparação de técnicas FS (PCC, ANOVA, RF, XGBoost e LightGBM). - Integração no MES para previsão de reabastecimento automatizada.
Engineering change order processing in ERP systems	Benoît Saenz de Ugarte; Adhène Hajji; Robert Pellen; Abdelhakim Arbia	2010	Arquitetura	Desenvolver uma arquitetura de execução em tempo real que complemente o modelo tradicional ERP/MES, proporcionando apoio à decisão reativa em resposta a eventos perturbadores no fabrico. O estudo visa mostrar, através de um Caso Industrial da indústria aeroespacial, como a integração de um algoritmo genético e de um modelo de simulação de eventos discretos em tempo real permite processar ordens de alteração de engenharia de forma dinâmica e otimizada, reduzindo tempos de produção e melhorando a capacidade de resposta.	Indústria aeroespacial - fabrico de componentes complexos sujeitos a múltiplas alterações de engenharia.	O MES atua como elo entre o ERP (SAP R/3) e o sistema de apoio à decisão, recolhendo dados do chão de fábrica e fornecendo informação sobre estados de ordens, máquinas e ferramentas. Permite reagendar ordens de produção e criar novas ordens quando ocorre uma alteração de engenharia (ECO). Funciona como camada operacional que comunica com o núcleo de simulação e otimização, garantindo resposta rápida e sincronização com o ERP.	- Suporte à decisão em tempo real. - Reprogramação automática de ordens. - Redução até 13,6 % do tempo total de produção. - Maior flexibilidade perante alterações. - Integração direta com ERP. - Comunicação OPC e SQL/XML. - Rastreabilidade e sincronização de dados.	- Complexidade de integração de ERP-MES-DSS. - Necessidade de parametrização intensiva. - Dependência de algoritmos específicos. - Ausência de interface de utilizador avançada. - Limitação do teste a um único Caso Industrial.	- Simulação de eventos discretos acoplada a algoritmo genético (GA). - Comunicação ERP-MES via OPC e SQL/XML. - Gestão automática de ordens ECO. - Otimização multiobjetivo (minimizar tempo de produção e atrasos).

<i>Design choices for next-generation IoT-connected MES/MOM: An empirical study on smart factories</i>	Soujanya Mantravadi; Charles Maller; Chen Li; Reto Schnyder 2022 Arquitetura	Investigar e propor uma arquitetura de nova geração para sistemas MES/MOM conectados à IIoT, aplicável em fábricas inteligentes e ambientes brownfield. O estudo identifica requisitos de design com base na norma ISA-95, abordando padronização, interoperabilidade e modularidade. A investigação empírica incluiu um estudo de caso no Smart Lab da Universidade de Aalborg e três mostradores industriais, resultando em recomendações para MES/MOM distribuíveis, seguros e interoperáveis, centrados na integração IT/OT e na resposta flexível à produção personalizada.	Fabrico discreto (ambiente acadêmico-industrial com mostrações na indústria dinamarquesa; caso Smart Lab Festo CP Factory)	O MES/MOM atua como núcleo da arquitetura de informação da fábrica inteligente, interligando ERP, dispositivos IIoT, plataformas de dados e módulos de produção. Recolhe, interpreta e distribui dados de fabrico em tempo real, assegurando rastreabilidade, controlo distribuído, personalização em massa, escalabilidade para ambientes industriais complexos. Ausência de métricas de desempenho. criptográficos e autenticação. - Padronização ISA-95. - Interoperabilidade entre sistemas. - Integração vertical ERP-MES-IIoT. - Modularidade e extensibilidade via plena. - Dependência de software MQTT, Python middleware). - Limitações do código aberto em ambientes industriais complexos. - Interoperabilidade semântica entre sistemas. - Segurança via protocolos criptográficos e autenticação.
<i>Material-flow modeling technology and its application in manufacturing execution systems of petrochemical industry</i>	Defang Li; Lu Liu; Wei Zhu; Gang Rong 2008 Arquitetura	Propor um modelo dinâmico de fluxo de materiais adequado a processos petroquímicos, capaz de refletir com precisão e em tempo útil os eventos logísticos de movimento e armazenamento. Apresentar definições formais de incidentes logísticos e regras de atualização do modelo ao longo do ciclo de produção, substituindo a modelação estática por enumeração. Mostrar a aplicação prática no SinMES V2.0 para gerir medições, armazenamentos, movimentos e saldos de materiais em tanques e equipamentos, reduzindo erros e facilitando a reconciliação e integração de módulos no MES.	Indústria petroquímica (refinação; hidrogenação III, CDU; gestão de tanques e fluxos de líquidos/gases/sólidos).	- Modelo ajustado ao processo real em cada ciclo. - Redução da complexidade e dados robusta e captação fiável de eventos. - Necessidade de plataforma de dados robusta e captação fiável de eventos. - Esforço inicial de formalização (definições e regras). - Dependência de qualidade/latência de medições em processo contínuo. - Comparação experimental com modelo estático por enumeração. - Redução de dimensão e melhor rastreio em tempo real. - Modelação dinâmica baseada em incidentes logísticos (move_evt, Conjuntos temporais U(T), M(T), X(T), V(T)). - Regras de atualização por ciclo. - Plataforma de dados SinMES V2.0. - Comparação experimental com modelo estático por enumeração. - Redução de dimensão e melhor rastreio em tempo real.
<i>The practices of integrating manufacturing execution system and Six Sigma methodology</i>	Yeong-Dong Hwang 2006 Arquitetura	Discutir e detalhar as práticas de integração entre o sistema MES e a metodologia Six Sigma segundo as cinco fases DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar). Pretende-se eliminar falhas decorrentes de dados incompletos e reduzir custos e tempo de recolha de informação, melhorando a fiabilidade estatística das medições. O artigo mostra como a integração MES-DMAIC melhora o desempenho e a capacidade do processo, reduz o tempo de ciclo, aumenta o rendimento acumulado e diminui os custos operacionais nas indústrias transformadoras.	Indústrias transformadoras (aeroespacial, automóvel, semicondutores, optoeletrónica, farmacêutica e petroquímica).	- Base centralizada de dados para Six Sigma. - Redução do tempo de ciclo. - Melhoría da capacidade do processo. - Incremento do rendimento acumulado (RTY). - Redução de custos operacionais. - Automação da recolha de dados. - Planeamento da produção em tempo real. - Melhoría da qualidade do WIP e da rastreabilidade. - Dependência de qualidade de dados. - Necessidade de integração completa ERP-MES. - Complexidade do SPC/MSA. - Formação em estatística industrial. - Planeamento de exemplos quantitativos industriais reais dinâmico. - Melhoría contínua (kaizen).

<i>RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production</i>	Ray Y. Zhong; Sheng Yang; Tan Yingfeng Zhang; Da Xu Wang 2013 Arquitetura	Apresentar o desenvolvimento de um sistema MES em tempo real, suportado por tecnologia RFID e comunicação web, orientado para ambientes de produção personalizados em massa. O objetivo é permitir rastreabilidade total de materiais, rastrear a produção e dados de produção e fornecer visibilidade global do estado do chão de fábrica. O estudo propõe uma arquitetura multicamada com integração RFID-MES-ERP e valida-a num protótipo industrial, mostrando ganhos de eficiência operacional, redução de erros humanos e melhoria da capacidade de resposta a pedidos individualizados.	O MES atua como núcleo de integração e execução, comunicando com dispositivos RFID, leitores e PLCs para recolha automática de dados de produção. Gere ordens, monitoriza o fluxo de materiais e atualiza estados de processo em tempo real. Fornece informação analítica e indicadores de desempenho, e comunica com o ERP através de serviços web XML. O MES garante sincronização entre planeamento e execução, suporte à personalização e visibilidade de toda a cadeia de fabrico.	- Rastreabilidade em tempo real. - Recolha automática de dados via RFID. - Eliminação de inserção manual de dados. - Redução de erros humanos. - Aumento da precisão da informação. - Sincronização automática com ERP. - Monitorização global do chão de fábrica. - Suporte à produção personalizada e flexível.	- Custos iniciais elevados de implementação RFID. - Middleware baseado em XML/Web Services. - Camada de controlo distribuído por PLCs e leitores RFID. - Complexidade de integração ERP-MES. - Dependência de tags RFID adequadas a condições industriais. - Dificuldade de padronização de dados. - Base de dados relacional em tempo real.
<i>Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system</i>	Pedro Daniel Urbina Coronado; Roby Lynn; Wiata Louichi; Mahmoud Parto; Ethan Wescoat; Thomas Kurfuss 2018 Arquitetura	Apresentar o desenvolvimento de um MES de baixo custo, implementado em dispositivos Android e suportado por tecnologias MTConnect de máquinas-ferramentas com dados de operadores, ferramentas e materiais. O objetivo é proporcionar recolha e sincronização de dados em tempo quase real, eliminando formulários manuais e viabilizando a construção de um gêmeo digital do chão de fábrica (<i>Shop Floor Digital Twin</i>). O sistema é aplicado num caso de estudo de fabrico de peças de titânio, mostrando rastreabilidade, conectividade e acessibilidade global.	O MES atua como elemento central do CPS, reunindo dados MTConnect de máquinas CNC e informações fornecidas por operadores através da aplicação móvel. Gere inventário de materiais, ferramentas e produtos, correlacionando tempos de fabrico e dados de energia e posição. Armazena a informação em base de dados na nuvem, disponibilizando-a em visualizações web quase em tempo real. O MES serve de elo entre CNC, nuvem e gêmeo digital do chão de fábrica.	- Baixo custo e fácil implementação. - Eliminação de papel e erros manuais. - Rastreabilidade completa. - Integração com MTConnect. - Acessibilidade global. - Visualização em tempo real. - Armazenamento seguro em nuvem. - Adequado a PME.	- Integração MTConnect-MES via REST e MySQL. - Aplicação Android para entrada de dados. - Serviços web em nuvem. - Captação de imagens e códigos de barras. - Correlação de dados CNC com registos do operador. - Modelo de Gêmeo Digital interoperável entre sistemas CNC, MES e nuvem.
<i>SAP R/3 in process industries: experiences and outlooks</i>	Andreas Schumann 1997 Arquitetura	Analisar a utilização do SAP R/3 como sistema de execução da produção em indústrias de processo, descrevendo funções MES suportadas pelos módulos MM, PP-PJ, WM e QM, e as interfaces padrão para DCS/LIMS/SCADA. Apresentar experiências de implementação real em fábricas químicas com diferentes graus de automação, identificar lacunas funcionais face às necessidades de controlo por lotes e discutir cenários de integração com sistemas técnicos de base, incluindo implicações para planeamento, qualidade e rastreabilidade.	O SAP R/3 é posicionado como "espinha dorsal" MES para coordenação, acompanhamento e documentação de fluxos de materiais, atividades de produção e movimentos econômicos, integrando funções de gestão de materiais, ordens de processo, armazéns e qualidade. Liga-se a sistemas técnicos (DCS, LIMS, SCADA) e utiliza receitas PP-PJ como base de planeamento e registo eletrónico de lotes; contudo, certas necessidades de controlo por lotes requerem sistemas especializados ou regras organizacionais.	- Cobertura incompleta de requisitos específicos de processo/batch - Tratamento simultâneo de concentração e quantidade), rudimentar e pouco ergonómico. - Uso de receitas PP-PJ e registo eletrónico de lote. - Comparação PP-PJ vs ISA-88 (equipamento/fases). - Necessidade de manter receitas em dois sistemas no cenário com automação de sistema de batch. - Risco do paradigma monolítico de integração.	- Módulos SAP MM/PP-PJ/WM/QM. - Integração com DCS/LIMS/SCADA. - Comparação PP-PJ vs ISA-88 (equipamento/fases). - Necessidade de manter receitas em dois sistemas no cenário com automação de sistema de batch.

Benefit Model of Virtual Metrology and Integrating AVM Into MES	Fan-Tien Cheng; Jonathan Yung-Cheng Chang; Hsien-Cheng Huang; Chi-An Kao; Ying-Lin Chen; Ju-Lei Peng	2011	Arquitetura	Desenvolver um modelo de benefícios que quantifica o impacto económico e produtivo da metrologia virtual (VM) e propor um novo sistema de fabrico que integra o módulo de metrologia virtual automática (AVM) no MES. O estudo mostra como a AVM transforma a inspeção por amostragem em inspeção total em tempo real, reduzindo custos de metrologia e tempo de ciclo, enquanto melhora o controlo de qualidade wafer-to-wafer (W2W) através da integração com controladores run-to-run (R2R) e módulos de SPC, alarmes e planeamento do MES.	O MES serve como plataforma central de controlo e coordenação das operações de fabrico, integrando o módulo AVM para permitir inspeção de qualidade total em tempo real. Através da ligação aos controladores R2R e aos gestores de equipamentos, alarmes e planeamento, o MES recolhe dados de processo e metrologia, processa valores de VM e atualiza o estado de produção. A integração AVM-MES possibilita controlo contínuo wafer-to-wafer, eliminação de wafers de teste e melhoria do rendimento global da fábrica.	- Inspeção total em tempo real. - Redução de tempo de ciclo ($\approx 9,5\%$). - Redução de custos de metrologia ($\approx 21\text{ M USD capex} + 1\text{ M USD ano em operações}$). - Controlo W2W preciso. - Aumento do rendimento e da qualidade ($\Delta Y \approx 0,26\%$). - Menor consumo de wafers de teste ($\approx 6,7\%$). - Indicadores RIGSI/DQI de confiabilidade. - Complexidade na atualização dos modelos VM. - Elevada dependência de dados de processo fiáveis.	- Integração AVM-MES-R2R. - Algoritmo de metrologia virtual de fase dupla (velocidade e precisão). - Indicadores RIGSI/DQI de confiabilidade. - Controlo W2W em tempo real. - Arquitetura modular plug-in para MES.	
	An IoT-Enabled Real-Time Dynamic Scheduler for Flexible Job Shop Scheduling (FJSS) in an Industry 4.0-Based Manufacturing Execution System (MES 4.0)	Anum Tariq; Shoab Ahmed Khan; Wasi Haider But; Asim Javaid; Tehmina Shehryar	2024	Arquitetura	Fabrico discreto com job shop flexível (benchmarks + dados reais de uma organização de fabrico).	O MES 4.0 integra o reagendador e orquestra a execução: recebe estados de máquina em tempo real via IoT/SSN, deteta avarias, aciona a RCSGR e publica novas sequências para manter a continuidade produtiva com mínimo desvio face ao plano. Elimina relatórios manuais, suporta decisão proativa e fecha o ciclo monitorização-decisão-execução dentro do próprio MES.	- Reação automática a avarias. - Robustez e estabilidade de reagendamento. - Decisão proativa com dados IoT. - Continuidade por redistribuição de operações. - Desempenho superior a RS/RC/IHA. - Redução do "nervosismo" operacional. - Necessidade de rede IoT e instrumentação (sensores de corrente, SSN). - Parametrização cuidada de GA e limiares. - Validação focada em avarias únicas. - Ausência de métricas de fábrica (energia, utilização) na avaliação. - GA para programação de referência. - RCSGR (integra RS, RC, SGR) para reagendamento parcial. - Rede IoT/SSN com sensores de corrente e comunicação M2M. - Detecção automática de avarias. - Métricas de robustez/estabilidade/eficácia composta.	- Reação automática a avarias. - Robustez e estabilidade de reagendamento. - Decisão proativa com dados IoT. - Continuidade por redistribuição de operações. - Desempenho superior a RS/RC/IHA. - Redução do "nervosismo" operacional.
	An Asset Administration Shell Method for Data Exchange Between Manufacturing Software Applications	Xun Ye; Mengmeng Yu; Won Seok Song; Seung Ho Hong	2021	Arquitetura	Indústria de fabrico discreto - integração digital de aplicações empresariais e de chão de fábrica.	O MES atua como fonte operacional do modelo AAS, fornecendo dados de ordens de produção, execução e custos em tempo de execução. A interface AAS converte os ficheiros CSV gerados pelo MES em dados estruturados para o modelo AAS, permitindo a comunicação direta com o ERP via OPC UA. O MES mantém assim a rastreabilidade e a consistência das informações de fabrico, assegurando a sincronização bidirecional entre execução e gestão empresarial.	- Comunicação em tempo real complexa e tecnicamente exigente. - Implementação inicial baseada em AutomationML. - Elevada dependência de normalização e conformidade de modelos AAS. - Validação restrita a ferramentas genéricas (Odo e Excel). - Ausência de teste em ambiente industrial real. - Interoperabilidade total via AAS. - Redução de erros e atrasos na transferência de dados. - Estrutura extensível e normalizada (IEC 62264, AutomationML, OPC UA). - Eliminação de ficheiros CSV.	- AAS para MES e ERP baseados em AutomationML. - Integração de modelos através de OPC UA (cliente-servidor). - Submodelos para ordens e custos de fabrico. - Conversão automática de ficheiros CSV em dados AAS. - Eliminação de silos de dados entre empresariais.N30.

Modeling of RFID-Enabled Real-Time Manufacturing Execution System in Mixed-Model Assembly Lines Zhixin Yang, Wei Xu, Pak-Kin Wong, Xianbo Wang 2015 Arquitetura	Desenvolver um modelo de Sistema de Execução da Produção (MES) em tempo real suportado por tecnologia RFID, aplicado a linhas de montagem de modelos mistos, com capacidade para recolha automática de dados, rastreabilidade de objetos de fabrico e integração de planeamento e escalonamento. O estudo visa superar limitações dos sistemas tradicionais através de uma abordagem heurística de decomposição Lagrangiana generalizada, otimizando simultaneamente configuração de sensores, planeamento da produção e escalonamento.	Sistema de execução e controlo em tempo real, integrando a recolha de dados via RFID, o planeamento e o escalonamento de produção em ambiente de linha mista.	- Rastreabilidade integral de peças, ferramentas e operadores. - Aquisição automática e sem contacto de dados de produção. - Melhoria da agilidade e visibilidade no chão-de-fábrica. - Integração direta com planeamento e programação. - Redução de erros humanos e de tempos de <i>setup</i>. - Complexidade de configuração e calibração da rede. - Necessidade de filtragem de dados redundantes ou perdidos. - Custos iniciais elevados de implementação e otimização de sensores. - Problemas de fiabilidade em ambientes industriais ruidosos. - Aumento da precisão na monitorização e controlo de processos.	- Aquisição de dados em tempo real através de leitores e etiquetas RFID ativas e passivas. - Processamento hierárquico de eventos RFID (filtragem, deteção de redundâncias e compensação de falhas). - Otimização conjunta de planeamento e escalonamento via decomposição Lagrangiana iterativa. - Aumento da precisão na monitorização e controlo de processos.	
Design and Implementation of a Machine Log for PBF-LBM on Basis of IoT Konstantin Poka, Sozol Ali, Waleed Saeed, Benjamin Merz, Martin Epperlein, Kai Hilgenberg 2024 Arquitetura	Conceber e operacionalizar uma cadeia de processamento de dados (ETL – Extract, Transform, Load) que extraia, processe e organize dados de máquinas PBF-LBM, com base em arquiteturas de comunicação IoT, criando um registo digital ("machine log") de cada ciclo de fabrico. O objetivo é viabilizar a integração destas máquinas com o MES, garantindo interoperabilidade e rastreabilidade dos processos. O sistema utiliza protocolos OPC UA, MQTT e REST API para recolher sinais de sensores e dados de processo, reorganizando-os em entidades normalizadas para apoio à garantia de qualidade e controlo estatístico.	Fabrico aditivo metálico (Powder Bed Fusion with Laser Beam of Metals – PBF-LBM).	- Interoperabilidade entre PBF-LBM, SCADA e MES através de OPC UA. - Rastreabilidade completa por ciclo, amostras devido à taxa de aquisição dos sensores. - Dependência de sincronização precisa de relógios e timestamps. - Complexidade na integração de múltiplos protocolos IoT. - Necessidade de elevada capacidade de armazenamento e processamento.	- Cadeia ETL modular implementada em Docker com microserviços. - Comunicação IoT via OPC UA, MQTT e REST API. - Integração com base de dados NoSQL (MongoDB). - Estruturação de dados por entidades: máquina, ciclo, parte, camada e vetor. - Garantia de interoperabilidade semântica segundo RAMI 4.0.	
Manufacturing Execution System Integration through the Standardization of a Common Service Model for Cyber-Physical Production Systems Richard Beregi, Gianfranco Pedone, Borbála Háy, József Vánca 2021 Arquitetura	Desenvolver e mostrar uma metodologia universal de modelação e integração de serviços de células de trabalho isoladas num sistema de produção padronizado e interoperável, suportado por um modelo de serviço comum para Sistemas Ciber-Físicos de Produção (CPPS). O estudo pretende redefinir o papel do MES como elemento de orquestração de serviços distribuídos e interoperáveis, através da combinação de OPC UA e MQTT, com validação em ambiente laboratorial de excelência.	Fabrico discreto e sistemas de produção ciber-físicos (ambiente de investigação e mostração industrial).	- Interoperabilidade total entre células heterogéneas. - Arquitetura modular e reconfigurável, integrada transparente de CPS legados e novos. - Integração transparente de OPC UA e MQTT. - Elevada rastreabilidade e sincronização de processos.	- Complexidade inicial de configuração das interfaces. - Necessidade de competências elevadas em normalização e semântica OPC UA. - Dependência de conectividade fiável e gestão de segurança de dados. - Limitações de desempenho a eventos e funções parametrizadas.	- Modelo de serviço comum baseado em OPC UA e MQTT. - Introdução da Production Administration Shell (PAS) como camada de geminação digital. - Interoperabilidade semântica entre MES e CPS. - Execução distribuída orientada a eventos e funções parametrizadas.

<i>"Emergency Response Plan" Automated System for Oil Production and Transportation Enterprises</i>	Conceber um sistema automatizado, análogo a SCADA, para apoiar a elaboração, revisão e execução do Plano de Resposta a Emergências em empresas de produção e transporte de petróleo. O sistema integra-se com outras aplicações industriais para agregação de dados operacionais, ambiente e presença de pessoal, fornece informação operacional estruturada ao responsável de resposta e permite gestão e rastreabilidade das ações. A solução assenta numa base de dados Oracle e num conjunto de serviços e interfaces que suportam consulta, alarmística e comunicação com subsistemas adjacentes.	Petróleo e gás: produção, refinação e indústrias (instalações perigosas).	O sistema proposto prevê troca de dados com sistemas automatizados da empresa e indica integração viável num MES para completar a descrição operacional e suportar coordenação entre serviços, incluindo encaminhamento de instruções e registo de ações. Nesse enquadramento, o MES pode atuar como repositório e orquestrador empresarial para consolidar eventos, disponibilizar contexto de produção e assegurar rastreabilidade das medidas executadas durante incidentes.	- Enriquecimento do contexto operativo durante incidentes com dados de chão de fábrica. - Rastreabilidade de ações e comunicação estruturada com equipas de resposta. - Integração com diretórios, mapas, rotas de evacuação e estados de equipamentos. - Possibilidade de automatizar alertas e instruções para sistemas adjacentes. - Dependência de integração com múltiplos sistemas legados e heterogêneos. - Carga adicional de consultas sobre a BD corporativa e necessidade de sincronização. - Gestão de permissões/acessos e salvaguarda de dados sensíveis em tempo real. - Ausência de validação industrial extensiva reportada no artigo. - Arquitetura cliente-servidor com Orade DBMS e serviços de análise/alarme. - Interligação a sistemas "Fire alarm", "Gas control", "Power supply" e outros. - Consolidação de geolocalização de viaturas, presença de pessoal e dados meteorológicos. - Emissão remota de instruções e seguimento de execução de medidas do plano.
<i>Development and application of equipment maintenance and safety integrity management system</i>	O estudo tem como objetivo desenvolver e aplicar um sistema de gestão de manutenção e integridade de segurança (MSI) para a indústria de processo petroquímica chinesa, integrando sistemas ERP, MES, RBI, RCM, SIL e PMS. Pretende-se eliminar as "ilhas de informação", melhorar a fiabilidade, disponibilidade e segurança dos equipamentos através de indicadores inteligentes de manutenção e decisão baseados em risco, e validar o modelo num caso real na Jinzhou Petrochemical Company.	Indústria petroquímica química de processo	O MES atua como fonte de dados de processo em tempo real, integrando-se no MSI para recolher e disponibilizar dados operacionais e históricos através de interfaces OPC e RFC. O seu papel é suportar a monitorização de condição, a análise RAM (Reliability, Availability, Maintainability), e a avaliação de risco dinâmica, permitindo a otimização das tarefas de manutenção e a tomada de decisão baseada em dados.	- Integração direta de dados de processo e manutenção em tempo real. - Suporte à previsão e diagnóstico de falhas. - Redução de parâmetros não planeados. - Melhoria da fiabilidade e segurança operacional. - Necessidade de padronização de dados e interfaces para integração eficaz. - Complexidade de implementação em sistemas legados ERP/EAM, indicadores RAM e risco dinâmico. - Elevada dependência de qualidade dos dados e sensores. - Integração ERP-MES-PWIS baseada em SOA. - Comunicação via OPC/RFC para troca de dados operacionais. - Modelo de decisão PDCA com indicadores ERP/EAM, RAM e risco dinâmico. - Suporte à manutenção preditiva e gestão de integridade de equipamentos.
<i>Securing IT/OT Links for Low Power IIoT Devices: Design Considerations for Industry 4.0</i>	Analisar os desafios de segurança resultantes da convergência IT/OT em ambientes IIoT com dispositivos de baixo consumo e propor recomendações de design para fábricas inteligentes seguras. O estudo combina revisão seletiva da literatura e um caso exploratório no Smart Production Lab, abordando gestão de chaves criptográficas, protocolos de autenticação e requisitos de projeto através de uma análise QFD, a fim de definir princípios de interligação segura entre MES e PLCs.	Indústria de fabrico modular (fábrica inteligente - Smart Lab / ambiente académico-industrial)	O MES atua como sistema de gestão operacional e ponto de interligação entre IT e OT (nível 3 ISA-95), responsável pela troca segura de dados com controladores lógicos programáveis (PLCs). É usado como base para estudar vulnerabilidades e requisitos de segurança em redes IIoT, permitindo a avaliação de protocolos criptográficos e o desenvolvimento de uma arquitetura de comunicação segura entre sistemas empresariais e o chão de fábrica.	- Centraliza a orquestração e coordenação das operações de produção. - Facilita a integração com PLCs e dispositivos IIoT. - Suporta a digitalização e modularidade da fábrica inteligente. - Permite a aplicação de protocolos de segurança e autenticação na camada de execução. - Vulnerabilidade em ambientes de ligação IT/OT sem camadas de segurança robustas. - Dependência de protocolos e infraestruturas complexas de criptografia e autenticação. - Dificuldade em assegurar escalabilidade em dispositivos IIoT com baixa capacidade de processamento. - Implementação de criptografia baseada em protocolos certificateless para autenticação segura. - Gestão distribuída de chaves e separação de domínios IT/OT. - Reforço da cibersegurança e resiliência em fábricas inteligentes.

<i>Designing a Cloud-Based MES-SaaS Platform Model in Precision Machining</i>	Yeji Do; Jongpil Jeong 2023 Arquitetura	Conceber um modelo de plataforma MES em regime de subscrição na nuvem para PME da maquinação de precisão, assegurando interoperabilidade de dados e redução de custos. Propõe a normalização de ativos com Asset Administration Shell, a ligação de equipamentos via OPC-UA e a integração de dados através do conector EDC, suportados por edge gateway e PLC. Pretende viabilizar módulos MES essenciais, aumentar a acessibilidade e escalabilidade e facilitar a transição de MES on-premises para SaaS com governança de segurança adequada.	O MES-SaaS é a camada operativa e de dados para produção, qualidade, inventário e condition monitoring. Agrega dados normalizados por AAS, requisita a recolha através de OPC-UA/edge, armazena em base de dados em nuvem e disponibiliza serviços e aplicações modulares para PME. Suporta configuração de equipamentos, rastreabilidade e operação serverless e multi-tenant com gestão central de segurança. - Migração de dados e compatibilidade entre AAS e armazenamento em AAS, AASX. - Redução de CAPEX e custos de licenciamento por modelo de subscrição. - Escalabilidade e atualização simplificada em nuvem. - Interoperabilidade de dados entre fabricantes via AAS/EDC/OPC-UA. - Dependência de conectividade IT/OT e de edge gateways.	- Normalização de ativos com AAS e armazenamento em AASX. - Recolha via OPC-UA entre customizações on-premises, PLC e edge. - Agregação e envio à cloud. - Integração entre sistemas heterogêneos com EDC. - Arquitetura multi-tenant com isolamento lógico e políticas unificadas de segurança.
<i>Electronic Document Management in Production Systems</i>	A. N. Fedanov, M. A. Shutikov, K. S. Ponomarev 2018 Arquitetura	Esclarecer benefícios e mecanismos da gestão eletrônica de documentos em ambiente industrial e analisar a interação com sistemas MES. Apresenta-se o fluxo de planeamento/monitorização no MES, com rescalonamento dinâmico e geração automática de protocolos de medição, e a sua integração num sistema de gestão documental com assinatura eletrônica e arquivo, visando maior eficiência, rastreabilidade e segurança da informação.	Planeia operações ao nível de postos, monitoriza saídas e otimiza cargas, gerindo a atividade corrente segundo encomendas, requisitos documentais e estado do equipamento. Cria modelos dinâmicos e diagramas de Gantt, reprograma em caso de avarias, e gera protocolos de medição que são encaminhados ao sistema documental para validação/arquivo com assinatura eletrônica, ligando processos produtivos e de negócio em tempo quase real. - Vinculo em tempo real entre processos produtivos e processos de negócio. - Otimização de cargas de equipamento e redução de custos. - Menor intervenção manual e maior produtividade. - Dependência de qualidade/sincronização de dados e de confirmação hierárquica de planos. - Assinatura eletrônica (hash + chave privada) para integridade/autenticidade. - Planeamento/controlo com diagrama de Gantt e modelo dinâmico de produção. - Reescalonamento automático perante falha da CMM. - Protocolos de medição gerados pelo MES e tratados no sistema documental.	- Planeamento/controlo com diagrama de Gantt e modelo dinâmico de produção. - Reescalonamento automático perante falha da CMM. - Protocolos de medição gerados pelo MES e tratados no sistema documental. - Assinatura eletrônica (hash + chave privada) para integridade/autenticidade.
<i>Basis for the model-driven engineering of manufacturing execution systems: Modeling elements in the domain of beer brewing</i>	Xinyu Chen, Fabian Gemein, Stefan Flad, Tobias Voigt 2018 Arquitetura	O estudo propõe uma abordagem de engenharia orientada a modelos (Model-Driven Engineering, MDE) para a geração automática de sistemas MES no setor alimentar e de bebidas. O objetivo é reduzir o esforço de programação e aumentar a reusabilidade através de bibliotecas pré-definidas de elementos de modelação (planta, processo, funções MES e relatórios). O trabalho centra-se na definição dos elementos de modelação e na sua aplicação inicial num caso de estudo de fabrico de cerveja, mostrando a viabilidade da abordagem.	O MES é concebido como elemento de ligação entre os níveis de automação e gestão, responsável pela recolha, gestão e análise de dados de produção, assegurando a integração vertical com ERP e controlo de processos. No estudo, o MES é implementado segundo uma abordagem model-driven, com bibliotecas específicas para funções como análise de desempenho, consumo energético e relatórios de eficiência. - Redução significativa do esforço de programação através de elementos reutilizáveis. - Melhoria da interoperabilidade e compatibilidade entre sistemas. - Comunicação estandardizada via Weihenstephan Standards (WS). - Maior transparência e rastreabilidade nos processos produtivos. - Possibilidade de geração automática de soluções MES.	- Aplicação da Engenharia Orientada a Modelos (MDE). - Modelação em quatro níveis: planta, processo, funções MES e relatórios. - Implementação limitada à fase de modelação (sem geração completa de código). - Necessidade de bibliotecas específicas por domínio industrial. - Dependência de modelos MES e cálculo de OEE/energia. - Suporte à interoperabilidade entre ERP, MES e equipamentos.

<i>SAMBA – an architecture for adaptive cognitive control of distributed Cyber-Physical Production Systems based on its self-awareness</i>	L. C. Sifara; H. Kholerdi; A. Bratukhin; N. Taherimejdi; A. Jantsch	2018	Arquitetura	Propor uma arquitetura cognitiva para controle adaptativo de sistemas ciber-físicos de produção distribuídos, capaz de monitorizar a saúde do sistema, diagnosticar anomalias e mitigar falhas com autonomia. A solução processa informação do chão de fábrica e interage com o MES para suportar decisões, coordenação e supervisão em tempo quase real. Introduz entidades cooperativas autônomas com auto-consciência, decisão cognitiva e dynamic clustering, visando maior resiliência, flexibilidade e qualidade em ambientes industriais complexos.	Transversal / ambiente laboratorial e simulado (exemplo: linha de montagem com transportadores e braços robóticos; caso AC-motor para saúde do sistema).	O MES é o ponto de interação da arquitetura cognitiva com a execução fabril, recebendo dados do chão de fábrica e suportando o envio de sel-points/ações resultantes da decisão cognitiva. A camada SAMBA acrescenta inteligência sobre sistemas legados, permitindo observação contextual, negociação entre entidades e coordenação distribuída, enquanto o MES mantém a orquestração e a supervisão operativa.	- Aumenta a capacidade de adaptação do sistema. - Permite detetar e mitigar anomalias quantitativas de integração com base em auto-monitorização. - Melhora a qualidade do processo por com sistemas distribuídos e legados. - Reduz esforço de engenharia através de abstração de dados e cooperação entre entidades. - Ausência de validação industrial completa e métricas finais. - Complexidade de integração com sistemas distribuídos e legados. - Dependência de comunicação fiável e sincronização entre entidades. - Simulação IEC 61499 com function blocks para verificar comunicação e escalabilidade.	- Entidades ACO com três módulos: SAHM (auto-monitorização/diagnóstico), Internal Manager (decisão), External Manager (negociação e dynamic clustering). - Abstração de dados, análise de confiança e previsão de efeitos da anomalia. - Simulação IEC 61499 com function blocks para verificar comunicação e escalabilidade.
<i>Towards development of cyber-physical systems based on integration of heterogeneous technologies</i>	SangSu Choi; Gylun Kang	2018	Arquitetura	Desenvolver uma arquitetura de sistema ciber-físico (CPS) assente na integração de tecnologias heterogêneas - MES, PLM, Process Mining, Simulação de Eventos Discretos e Realidade Virtual - para suporte ao fabrico inteligente. O objetivo é criar interoperabilidade entre sistemas físicos e digitais, permitir a análise, simulação e optimização de processos, e apoiar decisões operacionais e de engenharia de forma integrada, com base em dados reais de produção.	Indústria transformadora genérica, com caso aplicado a ambiente fabril real (produção e logística).	O MES atua como sistema central de recolha e gestão de dados do chão de fábrica, monitorizando em tempo real estados de máquina, ordens, operadores e qualidade. Fornece dados históricos e em tempo real ao PLM, ao Process Mining e à Simulação de Eventos Discretos, assegurando a integração vertical e horizontal da arquitetura CPS. É responsável pela orquestração de operações e pela execução das ordens após optimização.	- Recolha automática e fiável de dados de produção, com PLM, PM e sistemas de simulação. - Integração direta com PLM, PM e sistemas de simulação. - Melhoría da rastreabilidade e da análise de desempenho. - Suporte à interoperabilidade em conformidade com ISA-95 e OPC UA. MES e PM (ligação parcial). - Necessidade de reconfiguração para interoperar com múltiplos sistemas. - Dependência de normalização e interfaces padronizados (ISA-95, CIMS), Limitação de automação entre MES e PM (ligação parcial). - Integração entre MES, PLM, PM, DES e VR segundo arquitetura em 5 níveis. - Fluxo de dados bidirecional entre níveis físico e cibernético. - Diagnóstico, simulação e optimização contínua dos processos produtivos. - Reconfiguração virtual validada antes da execução real.	- Integração entre MES, PLM, PM, DES e VR segundo arquitetura em 5 níveis. - Fluxo de dados bidirecional entre níveis físico e cibernético. - Diagnóstico, simulação e optimização contínua dos processos produtivos. - Reconfiguração virtual validada antes da execução real.
<i>Virtual Factory Model Development for AI-Driven Optimization in Manufacturing</i>	E. L. Itskovich	2016	Arquitetura	Definir uma estratégia racional de construção de um MES para indústrias de processo, incluindo análise do estado atual da automação, requisitos funcionais e técnicos, e a sequência de implementação dos componentes. Pretende-se orientar a seleção independente de fornecedores e o planeamento faseado, assegurando interoperabilidade com sistemas de nível inferior, plataformas empresariais e serviços de apoio (LIMS, manutenção, energia), bem como critérios de eficiência e atualização contínua do plano diretor.	Indústria (process industries) transformadora - orientação transversal.	Servir como plataforma de informação e orquestração operacional que recolhe dados dos níveis inferiores, consolida balanços de materiais, suporta planeamento/calendário e despacho, integra LIMS e gestão (PM) e gere portais recursos energéticos (ACODM), com requisitos de modularidade, escalabilidade, abertura e segurança de acesso.	- Estrutura modular com expansão faseada dos componentes. - Melhoría do planeamento, controlo e balanços de materiais. - Relatórios flexíveis e acesso via web/SQL. - Base para estimar eficiência e retorno de implementação. - Longo período de implantação (3-5 anos) e obsolescência possível do plano. - Risco de conceitos envidados por fornecedores ou peritos independentes. - Dependência da maturidade da automação de nível inferior e qualidade de dados.	- Plataforma de informação MES, consolidação de balanços, calendarização/escala e despacho. - Integração de LIMS, PM e gestão de energia (ACODM). - Sequenciação racional de implementação por prontidão de dados/impacto. - Requisitos de abertura, escalabilidade, assinaturas eletrónicas e controlo de acessos.

<i>Using immune designed ontologies to monitor disruptions in manufacturing systems</i>	Nawel Bayar, Saber Darmoul, Sonia Hajri-Gabouji, Henri Pierreval 2016 Arquitetura	Propor uma abordagem baseada em conceitos de imunologia para detectar perturbações em sistemas de produção, inferir consequências e apoiar decisões de reação. A solução estrutura conhecimento com ontologias e regras (SWRL), combinadas com um sistema multi-agente, para operar on-line com dados atuais do chão de fábrica e superar limitações de métodos off-line. Pretende-se compatibilidade com sistemas empresariais, incluindo ERP e MES, e mostra-se a relevância com um caso ilustrativo na indústria do aço.	O MES surge como sistema de execução e fonte de dados on-line (via SCADA) para estados/médices, servindo de base às inferências de detecção, propagação de efeitos e recomendação de ações. A arquitetura é pensada para ser "embebida" em sistemas de informação industriais (ERP/MES), permitindo que as decisões inferidas influenciem a coordenação e supervisão operacionais.	- Disponibiliza dados atuais para detecção on-line de perturbações. - Suporta propagação de efeitos e avaliação de riscos de forma integrada. - Facilita a integração com ferramentas de decisão e controlo. - Dependência da qualidade dos dados recolhidos e pré-processados. - Necessidade de normalização de formatos e protocolos de comunicação. - Custo inicial associado à implementação de interfaces e sensores.	- Ontologia imuno-inspirada: Self/Non-Self, Antigen, Pathogen, Danger Signal. - Regras SWRL e restrições para inferência e propagação de efeitos (ETA/FTA). - Acoplamento a sistema multi-agente (APC/Pathogen/Cell/B-cells). - Integração técnica com ERP/MES/SCADA para operação on-line.
<i>The Methodology of Development of the Manufacturing Information Acquisition System (MIAS) for Production Management</i>	Grzegorz Ówika 2014 Arquitetura	Desenvolver uma metodologia universal para conceber sistemas de aquisição de informação de produção (MIAS) que permitam recolher, integrar e pré-processar dados provenientes do chão de fábrica. O objetivo é assegurar a comunicação contínua entre as camadas de produção e de gestão (MES/ERP), independentemente do tipo de processo produtivo. A metodologia propõe etapas analíticas e de síntese que visam reduzir o ruído informacional e garantir dados fiáveis para suporte à decisão.	O MES atua como destinatário e utilizador dos dados processados pelo MIAS, recebendo de sensores, sistemas SCADA e fontes manuais. Funciona como camada de execução e gestão operacional que utiliza dados em tempo real para monitorização, planeamento e controlo, garantindo coerência entre o chão de fábrica e o ERP.	- Melhoria da integração vertical e horizontal de dados. - Acesso em tempo real ao estado de ordens, máquinas e recursos. - Aumento da fiabilidade e consistência da informação. - Dependência da qualidade dos dados recolhidos e pré-processados. - Necessidade de normalização de formatos e protocolos de comunicação. - Custo inicial associado à implementação de interfaces e sensores.	- Aquisição automática e semiautomática de dados (via PLC, SCADA, RFID). - Pré-processamento e agregação de dados para reduzir ruído informacional. - Comunicação bidirecional entre MIAS, MES e ERP.
<i>Design of Manufacturing Execution System for FMCG Industries</i>	Arindam Banerjee, Naveen Bommu, Prateek Agarwal, N. Jaisankar 2013 Arquitetura	Desenvolver uma arquitetura MES específica para a indústria de bens de grande consumo, com base em detecção de eventos de produção em lote. O modelo proposto visa melhorar a comunicação bidirecional entre os sistemas ERP e MES, assegurando a transferência eficiente de dados de produção, consumo de matérias-primas e qualidade. Pretende-se otimizar a captura e análise de dados em tempo real, reduzindo custos e aumentando a fiabilidade da informação no controlo produtivo.	O MES é responsável por gerir a execução da produção em lote, capturar eventos de produção, processar dados de desempenho e comunicar em tempo real com o ERP. Atua como camada intermédia entre o sistema de controlo e o ERP, assegurando a consistência dos fluxos de informação, a rastreabilidade e a atualização automática de dados de produção e qualidade.	- Melhoria da comunicação bidirecional - Redução de tempo de processamento e custos operacionais. - Recolha automática e precisa de dados de produção em lote. - Aumento da eficiência e rastreabilidade. - Necessidade de integração rigorosa entre diferentes sistemas e protocolos. - Elevada complexidade na configuração de eventos e meta-eventos. - Dependência de infraestrutura digital e de normalização de dados.	- Detecção e análise de eventos de produção em lote. - Comunicação bidirecional ERP-MES através de XML e FTP. - Integração entre servidor global, sistema de controlo e produção em tempo real. - Gestão automática de planos e relatórios de produção.

<i>RFID Based e- quality Tracking in Service-oriented Manufacturing Execution System</i>	FU Yingbin; JIANG Pingyu 2012 Arquitetura	O estudo tem como objectivo propor um modelo de rastreamento electrónico de qualidade (e-QT) para ambientes de execução de produção orientados a serviços (so-MES), capaz de recolher e processar em tempo real dados de estado e de qualidade no chão de fábrica. O sistema baseia-se em redes de dispositivos RFID para monitorizar o fluxo de processos de maquinaria e garantir a rastreabilidade e visibilidade das operações, constituindo um suporte à melhoria da qualidade e à gestão de dados em ambientes de fabrico discreto.	Fabrico discreto; componentes mecânicos; oficina de maquinaria CNC	O MES atua como sistema integrador de dados de estado e qualidade, recolhendo automaticamente informações provenientes de leitores RFID e sensores de medição. Facilita a rastreabilidade em tempo real de peças, operadores e recursos, apoiando funções de planeamento dinâmico, controlo da produção e gestão da qualidade em múltiplas etapas de maquinaria. O modelo propõe uma arquitetura de nós de rastreio ("e-QT nodes") interligados que compõem o ambiente operativo do so-MES.	- Recolha automática e fiável de dados em tempo real. - Integração direta entre processos de maquinaria e controlo da qualidade. - Aumento da rastreabilidade e visibilidade do fluxo de produção. - Suporte à melhoria da qualidade e redução de erros humanos. - Dependência de infraestrutura RFID e sensores calibrados. - Custo elevado de implementação inicial. - Requer integração adicional com sistemas CNC/PLC para comunicação plena. - Rastreabilidade digital e recolha de dados RFID. - Integração da qualidade em tempo real no controlo do processo. - Apoio à decisão em planeamento e monitorização via dados de estado e qualidade.
<i>Agent-based Simulation of an Autonomic Manufacturing Execution System</i>	Milagros Rolón; Ernesto Martínez 2012 Arquitetura	O estudo visa propor um sistema de execução de fabrico autónomo (@MES) baseado em agentes, capaz de integrar geração de planos e controlo de execução de forma distribuída e adaptativa. Pretende-se ultrapassar as limitações de sistemas centralizados, explorando unidades autónomas de decisão (agentes de ordem e de recurso) que aplicam ciclos MAPE para responder a perturbações, reorganizar recursos e garantir robustez e agilidade em ambientes dinâmicos de produção.	Processos industriais discretos e em lotes (multiproducto, caso de fábrica de tintas)	O MES atua como estrutura distribuída de decisão, composta por agentes de ordem e recurso que monitorizam, analisam, planeiam e executam (ciclo MAPE). Substitui a hierarquia rígida por interações descentralizadas, permitindo reagendamento em tempo real e controlo autónomo de tarefas. Integra-se tanto com os níveis de planeamento (ERP) como com o controlo/automação, através de sensores e atuadores virtuais que alimentam o sistema com dados de estado e qualidade.	- Maior agilidade e resiliência a eventos imprevistos. - Auto-configuração, auto-otimização e auto-recuperação via agentes autónomos. - Redução do tempo de computacional para simulação de parâmetros. - Dificuldade de integração com MES legados centralizados. - Complexidade de modelação e verificação das interações entre agentes. - Elevada exigência computacional para simulação de variações de ordens. - Aprendizagem e ajuste distribuído do fluxo produtivo. - Emergência de planeamento e controlo através de interações entre agentes. - Adaptação autónoma a falhas e variações de ordens.
<i>Functional Analysis of Manufacturing Execution System Distribution</i>	Aleksey Bratukhin; Thilo Sauter 2011 Arquitetura	O estudo analisa em que medida as funcionalidades de um MES podem ser distribuídas ao longo da hierarquia de automação, avaliando o impacto dessa distribuição na flexibilidade e otimização do sistema. Pretende mostrar como a descentralização das decisões de planeamento e execução, através de entidades cooperantes (ordens, recursos e supervisores), pode aumentar a capacidade de adaptação a ambientes de fabrico dinâmicos e imprevisíveis. A análise baseia-se nos modelos MESA e ISA-95, considerando diferentes arquiteturas distribuídas.	Fabrico discreto e flexível; indústrias de produção sob encomenda e alto mix/baixo volume	O MES é descrito como elemento de integração vertical entre o ERP e o controlo de chão-de-fábrica, assumindo funções de planeamento detalhado, alocação de recursos e monitorização distribuída. No paradigma distribuído, as decisões são tomadas por ordens e recursos cooperantes, mediadas por supervisores ou agentes de nível intermédio, substituindo o controlo centralizado por uma estrutura adaptativa que permite reconfiguração, reagendamento e manutenção autónoma.	- Aumento da complexidade de coordenação e comunicação entre entidades. - Risco de instabilidade ou "efeito bola-de-neve" em reagendamentos. - Necessidade de infraestrutura de comunicação robusta. - Maior dificuldade de validação e verificação de consistência global. - Distribuição funcional e estrutural das decisões (MESA functions). - Integração de ordens, recursos e supervisores em arquiteturas cooperantes. - Negociação, mediação e reagendamento dinâmico como mecanismos de flexibilidade. - Maior flexibilidade perante ordens dinâmicas e alterações de recursos. - Redução do tempo de ajustamento e maior resiliência operacional. - Integração vertical mais eficiente entre ERP e controlo. - Capacidade de adaptação a ambientes distribuídos e multi-planta.

<i>A Federated Information System Framework for Vertical Integration</i>	Fadi El Kalach; Jitendra Solanki; Anand Todkar	2024	Arquitetura	Desenvolver uma arquitetura federada de sistema de informação para integração vertical entre ERP, MES e dados do chão de fábrica. O objetivo é eliminar dependências centralizadas através de uma estrutura modular, escalável e interoperável que utiliza modelos de informação OPC UA, armazenamento em grafos de conhecimento e servidores GraphQL. O sistema foi validado com um protótipo de monitorização de caldeira que integra sensores de temperatura e nível de enchimento para mostrar a interoperabilidade entre nós autônomos e a recuperação colaborativa de informação.	O MES atua como camada intermediária na integração vertical, comunicando com o ERP e com os servidores OPC UA a nível de chão de fábrica. Serve como elemento orquestrador de dados de produção e manutenção, garantindo coerência semântica e interoperabilidade entre aplicações autônomas dentro da federação. Através da normalização de modelos de informação e da comunicação via MQTT e GraphQL, o MES contribui para decisões mais informadas e conectividade entre níveis operacional e empresarial.	- O MES atua como camada intermediária na integração vertical, comunicando com o ERP e com os servidores OPC UA a nível de chão de fábrica. Serve como elemento orquestrador de dados de produção e manutenção, garantindo coerência semântica e interoperabilidade entre aplicações autônomas dentro da federação. Através da normalização de modelos de informação e da comunicação via MQTT e GraphQL, o MES contribui para decisões mais informadas e conectividade entre níveis operacional e empresarial. - Requer capacidade de processamento em cada nó federado. - Estrutura de esquemas rígida em GraphQL e GraphQL e GraphQL. - Potenciais atrasos na resolução de consultas em sistemas com múltiplas camadas. - Complexidade de implementação e sincronização entre nós. - Falhas pela descentralização da informação.
				Indústria de fabrico discreto e de processo (aplicação experimental de monitorização de caldeiras industriais).	O MES é interpretado como um motor de workflow no contexto fabril: instancia, coordena e monitoriza a execução de processos de produção distribuídos, sincroniza recursos e operações, gere estados e eventos e trata exceções. Fornece visibilidade do progresso e pontos de controlo, suportando reconfiguração dinâmica e integração com níveis superiores e inferiores através de interfaces de processo.	- Complexidade na modelação de processos altamente dinâmicos. - Sobrecarga de orquestração e sincronização em redes distribuídas. - Execução distribuída com coordenação por eventos e regras de encaminhamento. - Ênfase em interoperabilidade, escalabilidade e tolerância a falhas.
<i>A Mobile Dashboard for Analytics-Based Information Provisioning on the Shop Floor</i>	Christoph Gröger; Christoph Slach; Bernhard Mitschang; Engelbert Westkämper	2016	Arquitetura	Conceber e avaliar o OPDM, um dashboard móvel e analítico para trabalhadores e supervisores no chão de fábrica, que disponibiliza informação de processo em tempo quase real e serviços de análise para otimização proativa. O trabalho define serviços por grupos de utilizadores, requisitos técnicos, modelo de contexto e questões de segurança, e implementa um protótipo sobre a plataforma Advanced Manufacturing Analytics com data mining, métricas e dashboards móveis. A solução é validada num Caso Industrial automóvel, mostrando viabilidade técnica e benefícios para melhoria contínua baseada em dados.	O MES é fonte estruturada de dados operacionais e de execução que alimentam o warehouse e os serviços analíticos da plataforma AdMA. Em conjunto com ERP e outras fontes, suporta cálculo de métricas, predição de desvios e recomendações prescritivas apresentadas no OPDM, permitindo comparar execução real com objetivos e antecipar ações corretivas no terreno.	- Plataforma AdMA com warehouse holístico, cálculo de métricas e data mining. - OPDM como frontend móvel, sensível ao contexto, com recomendações prescritivas. - Modelos de contexto (tempo, móveis/sensíveis ao contexto em soluções MES tradicionais, por QR, condições físicas). - Arquitetura cliente-servidor (DB2, Java EE/Tomcat, RapidMiner). - App Android).
				Indústria automóvel (caso de fabrico em massa de molas de aço)	O MES é fonte estruturada de dados operacionais e de execução que alimentam o warehouse e os serviços analíticos da plataforma AdMA. Em conjunto com ERP e outras fontes, suporta cálculo de métricas, predição de desvios e recomendações prescritivas apresentadas no OPDM, permitindo comparar execução real com objetivos e antecipar ações corretivas no terreno.	- Dependência forte da qualidade e tempestividade dos dados integrados. - Lacunas em funcionalidades móveis/sensíveis ao contexto em soluções MES tradicionais. - Integração adicional necessária para comunicação síncrona e multimídia.

<i>Framework and Deployment of a Cloud-Based Advanced Planning and Scheduling System</i>	Li-Chih Wang; Chun-Chih Chen; Jen-Li Liu; Pei-Chun Chu	2021 Arquitetura	Desenvolver um sistema de planeamento e sequenciação avançado (C-APS) baseado em computação em nuvem, incluindo a estrutura de serviços e a metodologia de implementação em plataformas públicas e híbridas. O estudo propõe um modelo de fábrica virtual com diagrama de pacotes que melhora a eficiência de modelação e a estabilidade dos dados. A solução é validada na programação de produção de uma empresa automóvel de componentes eletrónicos, mostrando aplicabilidade prática, baixos custos de manutenção e qualidade elevada de planeamento.	Indústria automóvel montagem de componentes eletrónicos (placas de circuito impresso)	O MES fornece dados operacionais essenciais ao modelo de fábrica virtual do C-APS, nomeadamente informações de equipamentos, tempo disponível, estado de VIP e parâmetros de processo. Serve de interface de recolha e atualização de dados em tempo quase real, complementando o ERP na preparação do modelo de simulação e no desencadeamento de eventos de planeamento e replaneamento. A integração MES-C-APS permite gerar planos de produção exequíveis e ajustados às restrições reais da fábrica.	- Integração direta de dados reais de chão de fábrica. - Redução de tempo de modelação e manutenção. - Planeamento realista e executável com base em restrições operacionais. - Capacidade de replaneamento rápido face a eventos não previstos. - Custos de interoperabilidade em infraestruturas híbridas. - Dependência da qualidade dos dados provenientes de ERP e MES. - Complexidade na sincronização entre sistemas locais e em nuvem. - Necessidade de competências técnicas para gestão de API e modelos de dados. - Modelação orientada a objetos (MDA) com diagrama de pacotes.
<i>Conceiving a Digital Twin for a Flexible Manufacturing System</i>	Laurence C. Magalhães; Luciano C. Magalhães; Jhonatan B. Ramos; Luciano R. Moura; Renato E. N. de Moraes; João B. Gonçalves; Willian H. Hisatugu; Marcelo T. Souza; Luis N. L. de Lacalle; João C. E. Ferreira	2022 Arquitetura	Conceber um gêmeo digital para um sistema flexível de fabrico, integrando sensores, PLC e módulos ERP/MES para monitorização, simulação e apoio à decisão em tempo quase real. O trabalho descreve a arquitetura de referência alinhada com ISA-95, os passos de criação do modelo e a execução de simulações sincronizadas com a célula física. Compara tempos simulados e reais, disponibiliza indicadores operacionais aos utilizadores e avalia a viabilidade técnica e económica com recurso a hardware e software de baixo custo.	Fabrico discreto (célula FMS com torno CNC, centro de maquinação, dois robots e transportadores; ambiente académico-industrial)	Utilizam-se módulos específicos de um sistema ERP/MES (planeamento de produção, gestão de fabrico, facilities layout e simulação) para digitalizar a entidade física, criar ordens, modelar centros de trabalho e executar simulações sincronizadas. O MES/ERP fornece estrutura de dados, HMI e cálculo de métricas (taxa de produção, filas, tempos de ciclo), servindo como cliente/ator no ciclo PDCA entre níveis 3–4 (MES/ERP) e níveis 0–2 (CPS).	- Digitalização integrada de ordens, centros de trabalho e layout. - Indicadores operacionais em tempo real (taxa, filas, estado de estações). - Suporte ao ciclo PDCA entre ERP/MES e CPS. - Redução de custos via uso de software/hardware de baixo custo. - Integração não trivial entre PLC, sensores e múltiplos protocolos. - Dependência de modelação rigorosa do layout e planeamento, gestão, layout e parâmetros. - Lacunas de interoperabilidade com plataformas abertas (sensores/PLC e sincronização DT–FMS).

Design and Implementation of an HPCS-Based PCB Smart Factory System for Next-Generation Intelligent Manufacturing	Jinyoub Kim, Dongjoon Seo, Jisang Moon, Juhee Kim, Hayul Kim, Jongpil Jeong	2022	Arquitetura	Apresentar o desenvolvimento e implementação de um sistema de fábrica inteligente baseado em sistemas Human-Cyber-Physical (HPCS 2.0) para a indústria de placas de circuito impresso (PCB). O objetivo é integrar inteligência artificial, IoT e computação em nuvem para recolha, análise e visualização de dados em tempo real, automatizar a inspeção de qualidade e melhorar a eficiência e sustentabilidade da produção. O estudo mostra como a aplicação combinada de tecnologias digitais pode aumentar a competitividade e reduzir defeitos em ambientes industriais.	Indústria de PCB semicondutores	O MES atua como núcleo integrador das operações produtivas, conectando sensores, PLCs e equipamentos via OPC-UA para recolher dados em tempo real e gerir processos de produção, qualidade e paragem. O sistema permite rastreabilidade completa por L0T, monitorização contínua e suporte à decisão, articulando-se com ERP e sistemas de visualização. O MES é responsável pela coordenação das operações, pela integração de dados provenientes da IoT e pelo controlo inteligente da produção, assegurando a ligação entre o chão de fábrica e os sistemas empresariais.	- Melhoria da taxa de operação das máquinas e redução de tempos de manutenção. O sistema permite rastreabilidade completa por eficiência global do equipamento (OEE). - Recolha automática de dados e controle integrado de qualidade. - Visualização em tempo real do estado da produção e anomalias. - Apoio à decisão baseado em dados e integração com ERP e AI.	- Complexidade de integração de múltiplos dispositivos e protocolos. - Necessidade de elevada capacidade computacional e rede robusta. - Dependência da fiabilidade dos sensores e da calibração dos algoritmos de IA.	- Integração vertical e horizontal através de arquitetura HPCS. - Recolha e análise de dados em tempo real via IoT e AI. - Automação de inspeção de qualidade e manutenção preditiva. - Melhoria contínua da eficiência produtiva e da rastreabilidade.
A Fog Computing Based Cyber-Physical System for the Automation of Pipe-Related Tasks in the Industry 4.0 Shipyard		2018	Arquitetura	Conceber e avaliar um sistema ciber-físico, suportado em fog computing, para identificação, localização e rastreabilidade de tubos ao longo do seu ciclo de fabrico num estaleiro. O sistema usa active RFID, serviços de location e business intelligence em gateways fog, e integra-se com ERP/MES corporativos para automatizar eventos operacionais e reduzir latência face à nuvem. O estudo compara arquiteturas fog e cloud em cenários reais e emulação de carga, medindo latência e taxa de processamento de amostras.	Construção naval / estaleiro (oficina de tubagens, Navantia Ferrol, Espanha)	O MES (Siemens Simatic IT) é integrado como sistema de execução e interface com operadores: recebe eventos de localização do CPS, atualiza task pools, permite atribuir tags RFID a tubos, iniciar/fechar operações, solicitar localização e sincroniza ordens com ERP. Funciona como camada de orquestração entre ERP e chão de fábrica, garantindo rastreabilidade e visibilidade do progresso em tempo quase real.	- Visibilidade e rastreabilidade de VIP RFID e qualidade de leitura em ambiente metálico. - Integração direta com CPS para emissão de avisos e atualização de tarefas. - Redução de papel e erros por digitalização de processos de oficina. - Consulta imediata da localização de tubos a partir do MES.	- Dependência da infraestrutura RFID e qualidade de leitura em ambiente metálico. - Necessidade de normalização de processos para integração ERP-MES-CPS. - Gestão de colisões e limitações de tags sob cargas elevadas.	- Arquitetura fog em três camadas (nó, fog, cloud). - Active RFID 433.92 MHz, leitores por área lógica e algoritmo de localização por RSSI com suavização/trends e thresholds. - Módulos Location e Business Intelligence para deteção de eventos e notificação ao MES. - Integração com ERP (SAP) e MES (Simatic IT).
Chat with MES: LLM-driven user interface for manipulating garment manufacturing system through natural language		2025	Arquitetura	Conceber e avaliar o "Chat with MES" (CWM), um agente de IA que integra modelos de linguagem no MES para permitir interação por linguagem natural em substituição da interface gráfica tradicional. Pretende-se reduzir custos de manutenção, complexidade de operação e necessidade de formação, validando precisão e fiabilidade por meio de um caso experimental num MES de confeção com pedidos representativos de trabalhadores e gestores.	Indústria têxtil e do vestuário (ambiente simulado de confeção)	O MES é a base transaccional (ordens, tarefas, materiais). O CWM interpreta pedidos em linguagem natural, reescreve entidades, gera planos multi-passo e executa operações SQL ou serviços do MES, assegurando rastreabilidade e controlo. Substitui a GUI por uma interface conversacional, mantendo o MES como núcleo operativo.	- Redução da complexidade de uso e do tempo de formação. - Diminuição do esforço de desenvolvimento/manutenção de GUI. - Interação natural e mais eficiente com o sistema. - Execução estruturada e audível de operações.	- Dependência da fiabilidade do LLM. - Risco de erros sintáticos/semânticos em SQL. - Garantia de atomicidade/consistência exige governação rigorosa.	- Reescrita de pedidos (desambiguação de entidades). - Planeamento dinâmico multi-etapas (SQL/Tool/Thought). - Text2SQL com validação incremental do contexto.

<i>Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) for Industry 4.0: Overcoming buyer-provider information asymmetries through knowledge sharing dynamics</i>	Verónica M. Tabim; Néstor F. Ayala; Giuliano A. Marodin; Guilherme B. Benitez; Alejandro G. Frank	2024 Caso Industrial	Compreender como a partilha de conhecimento pode reduzir as assimetrias de informação entre compradores e fornecedores durante a implementação do MES 4.0. O estudo propõe um modelo que relaciona a complexidade do sistema com a intensidade da partilha de conhecimento e define um quadro de decisão para orientar a colaboração em diferentes fases contratuais, assegurando maior alinhamento, transparência e sucesso na adoção de MES no contexto da Indústria 4.0.	Multissetorial – automóvel, mobiliário, agrícola, eletrónica, bebidas e equipamentos industriais. O MES atua como plataforma central da Indústria 4.0, integrando dados em tempo real entre o chão de fábrica e os sistemas de gestão (ERP). Serve como elo entre TI e TO, garantindo visibilidade operacional, integração vertical de contexto do estudo, é também o elemento em torno do qual se desenvolvem as dinâmicas de partilha de conhecimento e de confiança entre comprador e fornecedor.	- Integração vertical de dados. - Visibilidade em tempo real. - Redução de erros e falhas. - Suporte à decisão inteligente. - Ligação entre ERP, SCADA e chão de fábrica. - Maior colaboração e alinhamento estratégico. - Reforço da confiança e transparência entre parceiros. - Complexidade de integração. - Dependência de maturidade digital. - Risco de desalinhamento entre expectativas e funcionalidades. - Custos de personalização. - Falhas de comunicação técnica. - Assimetrias de informação em fases contratuais. - Partilha de conhecimento (transferência, transformação). - Colaboração comprador-fornecedor (caixa preta, branca cinzenta). - Redução da assimetria de informação. - Maturidade digital crescente e integração bidirecional MES-ERP.
<i>Personalization of the MES System to the Needs of Highly Variable Production</i>	B. Zwolińska; A. A. Tubis; M. Kostrzewski; N. Chamier-Gliwiński	2020 Caso Industrial	Apresentar um método de personalização do MES para produção altamente variável, recorrendo a inferência bayesiana aplicada à estrutura tecnológica do processo. Propõe-se o "índice de variabilidade" como métrica de eficácia do sistema e avalia-se o desempenho atual com base nesse índice. O algoritmo permite ajustar o modelo às condições reais sem reescrever a descrição do sistema, identificar áreas determinantes de instabilidade e controlar, em tempo real, a variabilidade gerada, contribuindo para uma execução mais estável e eficiente.	Fabrico discreto com centros de maquinaria CNC (departamento de maquinaria; células 1x1, 1x2 e 2x2 máquinas-operadores). Núcleo de gestão, monitorização e sincronização da execução física em tempo real, com feedback de desempenho, rastreabilidade a nível de componentes e materiais e métricas adequadas ao contexto (índice de variabilidade além de OEE/OOE/TEEP). - Limitações do OEE em séries curtas. - Necessidade de personalização e de maior capacidade analítica. - Dependência de dados fiáveis. - Possível sobrecarga de produtos. - Decisão de balanceamento para estabilidade operacional. - Resposta em tempo real a perturbações.	
<i>Smart CPS: vertical integration overview and user story with a cobot</i>	Levente Tamas; Mircea Murar	2018 Caso Industrial	Apresentar e mostrar uma aplicação de integração vertical completa entre o chão de fábrica e as camadas empresariais, recorrendo à implementação de um MES comercial (DELMIA Apriso) integrado com um robô colaborativo Baxter e um AGV, segundo os princípios da Indústria 4.0. O estudo procura mostrar como a integração MES-ERP-PLC-cobot-nuvem permite uma produção flexível, segura e sustentável, quantificando ganhos de eficiência, redução de desperdício e melhor interação homem-máquina.	Fabrico discreto de lâmpadas (automação e montagem com testes de qualidade). O MES (DELMIA Apriso) atua como núcleo de coordenação e comunicação entre o ERP (SAP), os controladores PLC Siemens S7-1200, o cobot Baxter e o AGV Turtlebot. Recebe ordens de produção, sincroniza operações, gera instruções de controlo e recolhe dados de processo em tempo real para monitorização e análise de desempenho. Serve de ponte vertical entre os níveis ISA-95, permitindo a rastreabilidade total e a reação automática a eventos de produção. - Integração vertical total ERP-MES-fábrica. - Reconfiguração flexível do espaço de trabalho. - Análise em tempo real. - Redução do tempo de configuração em mais de 20 %. - Melhoria da eficiência geral do equipamento (≈ 10 %). - Aumento da produtividade dos operadores (> 20 %). - Redução da taxa de desperdício (≈ 15 %). - Interligação MES-ERP-PLC via OPC. - Comunicação Modbus TCP/IP com cobot Baxter. - Gateway IoT2040 Siemens para a nuvem IBM Bluemix. - Publicação MQTT de dados de processo. - HMI interativa no chão de fábrica. - Recolha e análise de KPIs em tempo real.	

<i>A method to align functionalities of a manufacturing execution system with competitive priorities</i>	Apresentar e validar um método quantitativo baseado em modelação hierárquica (AHP) para alinhar as funcionalidades de um MES com as dimensões competitivas da produção (custo, qualidade, flexibilidade, fiabilidade e inovação). O método avalia 24 funcionalidades e 11 pilares MES, medindo a contribuição e a qualidade da implementação em duas empresas do setor metalomecânico. O objetivo é identificar quais funcionalidades devem ser exploradas, melhoradas ou descontinuadas, promovendo coerência entre execução operacional e prioridades estratégicas.	2020 Caso Industrial	Miguel Afonso Sellitto; Elisandro João de Vargas	O MES atua como ferramenta de ligação entre o ERP e o chão de fábrica, monitorizando máquinas, recursos humanos, manutenção, qualidade e planeamento. Fornece informação em tempo real para decisões operacionais e apóia o alinhamento entre prioridades competitivas e eficiência de produção. O sistema regista dados de operações, eficiência global (OEE), falhas e cumprimento de planos, servindo de base à análise de contribuição e qualidade das funcionalidades.	- Monitorização em tempo real, heterogéneas e incompletas, Melhor controlo de qualidade e custos. - Sincronização de operações, Identificação de funcionalidades críticas, Apoio à decisão estratégica, Recolha de dados normalizada, Reutilização de estruturas MESA/ISA-95. - Dependência de utilizadores experientes.	Implementações - Modelação hierárquica AHP, Classificação bidimensional (contribuição x qualidade), Análise de macro-objetivos a MESA, Avaliação por grupos focais, Cruzamento de prioridades competitivas e funcionalidades MES.
<i>An Open-Source Framework for the Storage and Reuse of Industrial Knowledge through the Integration of PLM and MES</i>	Desenvolver uma estrutura de código aberto capaz de integrar e reutilizar conhecimento proveniente dos sistemas PLM e MES, visando reduzir ciclos de tentativa e erro no desenvolvimento de novos produtos e processos. A proposta baseia-se num Sistema Baseado em Conhecimento (KBS) central que recolhe e relaciona dados de concepção e execução, especialmente sobre anomalias ocorridas na produção. O sistema foi implementado com ARAS PLM e PostgreSQL, validado num caso de fabrico de protótipos automóveis para mostrar a sua eficácia na gestão e reutilização de conhecimento industrial.	2020 Caso Industrial	Giulia Bruno; Alberto Favetto; Emiliano Traini	Indústria automóvel - fabrico de protótipos e produção personalizada altamente personalizada (OKP).	O MES atua como fonte e destino de informação operacional dentro do KBS, fornecendo dados de execução, desempenho e anomalias em tempo real. Estes dados são devolvidos ao PLM para permitir que projetistas e gestores melhorem processos e produtos. O MES digitaliza o chão de fábrica, regista verificações de operação, parâmetros de máquina e relatórios de produção, promovendo feedback bidirecional contínuo entre engenharia e produção.	- Digitalização do know-how tácito, Redução do tempo de conceção de processos, Reutilização de informação de anomalias, Feedback imediato PLM→MES, Apoio à decisão colaborativa, Preservação do conhecimento dos dados inseridos pelos operadores. - Integração inicial complexa, Necessidade de definir métricas e indicadores de desempenho, Ausência inicial de integração com ERP, Dependência de qualidade dos dados inseridos pelos operadores. - Sistema Baseado em Conhecimento (KBS), Replicação de dados PLM→MES (PostgreSQL), Modelo UML inspirado em CPM/TOVE/ADACOR, Fluxos contínuos de informação PLM→MES e feedback MES→PLM, Integração de verificações (CheckStart, OperationQuestion) e relatórios de produção no MES.
<i>A Radio Frequency Identification-Enabled Real-Time Manufacturing Execution System for One-of-a-Kind Production</i> <i>Manufacturing: A Case Study in the Mould Industry</i>	Desenvolver e validar um Sistema de Execução da Produção (MES) em tempo real suportado por RFID para produção de peças únicas (One-of-a-Kind Production) na indústria de moldes. O objetivo consiste em integrar informação de chão de fábrica e sistemas de planeamento, substituindo registos manuais por recolha automática de dados e aumentando a visibilidade do processo produtivo. O sistema propõe uma arquitetura RFID-MES e um modelo de fluxo de dados que permite rastrear peças, recursos e ordens em tempo real, reduzindo erros de inserção e atrasos de reporte.	2012 Caso Industrial	Kuo-Chung Wang; Fan-Tien Cheng; Kuang-Yow Lian; Chia-Hui Yang; Yuan-Hsuan Chang	Indústria de produção de moldes unitária personalizada (OKP – One-of-a-Kind Production).	O MES atua como núcleo central de coordenação entre ERP, chão de fábrica e leitores RFID. Gere ordens de fabrico, regista estados de operação, associa automaticamente operadores, máquinas e peças e fornece dados de desempenho em tempo real. O sistema substitui o registo manual de produção por recolha automática através de etiquetas RFID instaladas em moldes e ferramentas, permitindo rastreabilidade total, sincronização de planeamento e suporte à tomada de decisão.	- Rastreabilidade em tempo real, Eliminação de registos manuais, Atualização automática de estados de operação, Redução de erros humanos, Melhor comunicação ERP–chão de fábrica, Visibilidade integral do fluxo produtivo. - Custo inicial de implementação, Necessidade de infraestrutura estável, Interferências eletromagnéticas potenciais, Dependência de configuração correta das etiquetas, Resistência inicial dos operadores à adoção tecnológica. - Arquitetura integrada RFID–MES-ERP, Leitores fixos e móveis em pontos de processo, Middleware de recolha e filtragem de dados, Base de dados MES para rastreio e relatórios, Modelo de processo orientado a eventos, Feedback contínuo produção–planeamento.

		Desenvolver um sistema de aquisição de dados adequado ao fabrico de semicondutores compostos, capaz de recolher informações de processo em tempo real a partir de equipamentos e operadores, substituindo o método convencional em papel. O sistema utiliza o protocolo GEM para comunicação direta com equipamentos e recolha automática de dados, complementado por entrada digital via tablet. Pretende-se criar a base tecnológica para um MES em tempo real, assegurando monitorização de processo, cumprimento de prazos e redução do WIP (Work in Process).	2007	Caso Industrial	Seung Woo Lee; Hwa Ki Lee	O sistema de aquisição de dados serve como infraestrutura fundamental para um MES em tempo real recolhendo dados de operação, inspeção e equipamento diretamente do chão de fábrica. A informação é transmitida para o servidor MES para análise de desempenho, rastreabilidade e controlo de produção. A ligação entre os níveis de processo e gestão permite integrar departamentos de design, produção e qualidade, fornecendo ao cliente informação precisa para o serviço de fundição e cumprimento do calendário de entrega. - Monitorização em tempo real de processos e equipamentos. - Eliminação de formulários em papel. - Recolha automática via GEM. - Melhoria da fiabilidade dos dados (95 %). - Cumprimento rigoroso dos prazos. - Redução do tempo de ciclo (8 → 6 semanas). - Dependência de protocolos GEM e interfaces normalizadas. - Necessidade de infraestrutura de rede sem fios estável. - Custos de implementação. - Possível interferência MES. - Arquitetura sem papel. - Recolha automática de parâmetros de processo e inspeção.
<i>Data Acquisition System of Compound Semiconductor Fabrication</i>						
		Investigar problemas no fornecimento de peças em linhas de montagem de modelos mistos (MMAL) e propor estratégias integradas com o MES para otimizar o sistema Set Parts Supply (SPS). O objetivo é melhorar o fluxo de materiais, reduzir erros e eliminar esperas entre supermercado e linha de montagem. O estudo desenvolve e implementa três soluções principais - fornecimento sincronizado de peças, sistema e-kanban e Synchronized Supply Sheet (SSS) - avaliando o impacto na produtividade, tempo de espera e custos operacionais.	2014	Caso Industrial	Suhartini Mohd Janiun; Rizauddin Ramli; Mohd Nizam Ab Rahman; Azhan Omar	O MES atua como integrador entre ERP, fornecedores e chão de fábrica, fornecendo dados de sequencição, ordens e estado do WIP. Gere os módulos de planeamento, rastreabilidade, controlo de produção e interface com sistemas e-kanban e Synchronized Supply Sheet. O MES assegura o fluxo Just In Time, coordena o fornecimento de peças e elimina atrasos no inventário. - Integração ERP-chão de fábrica em tempo real. - Fornecedor sincronizado de peças (JIT). - Eliminação de formulários manuais e humanos, automação robusta. - Redução do tempo de espera e de produção. - Controlo preciso do WIP e rastreabilidade contínua. - Sistema Set Parts Supply (SPS) com fornecimento sincronizado. - E-kanban web-based integrado com MES e ERP. - Synchronized Supply Sheet (SSS) para comunicação entre áreas. - Redução de mão de obra e espaço ocupado. - Integração bidirecional ERP-MES para sequencição e controlo.
<i>Integrated Set Parts Supply System in a Mixed-Model Assembly Line</i>						
		Descrever o ciclo de vida do indicador OEE em linhas de montagem semi-automáticas automóveis, analisando a sua relação com custos de manutenção, mão de obra e qualidade. O estudo define as fases do ciclo de vida do OEE - ramp-up, fase produtiva e run-out - a partir de dados de quinze anos recolhidos via MES, associando-as ao ciclo de vida do produto. Visa ainda evidenciar tendências e interdependências entre OEE, custos operacionais e estabilidade de produção em ambientes industriais de grande escala.	2022	Caso Industrial	Péter Dobrá; János Jósvai	O MES é o sistema responsável pela recolha contínua de dados de disponibilidade, desempenho e qualidade em cada estação (manuais, automáticas e de teste). Os dados são usados para calcular o OEE e monitorizar a eficiência ao longo de todo o ciclo de vida do produto. O MES fornece informação fiável e em formato digital, permitindo correlacionar métricas de OEE com custos de manutenção, mão de obra e qualidade, servindo como base para decisões de melhoria contínua e gestão estratégica da produção. - Recolha automática e fiável de dados de desempenho. - Cálculo diário de OEE histórico. - Suporte a decisões de manutenção e qualidade. - Melhoria contínua com base em métricas precisas. - Redução de custos através da correlação OEE-custo unitário. - Exigência de recolha constante e padronizada de dados. - Dependência da calibração dos sensores e estações. - Dificuldade de adaptação em linhas heterogéneas. - Necessidade de competências analíticas avançadas. - Monitorização do ciclo completo do OEE (ramp-up, run-out). - Cálculo automático de disponibilidade, desempenho e qualidade. - Análise longitudinal de 15 anos de dados MES. - Correlação entre OEE e custos de manutenção, mão de obra e qualidade.
<i>Overall Equipment Effectiveness (OEE) Life Cycle at the Automotive Semi-Automatic Assembly Lines</i>						

<i>Digital Transformation for Improved Energy and Product Efficiency in Tire Production: A Case Study</i>	2023 Caso Industrial	Abdullah Temel; Murat Ayaz; Volkan Aygul	Desenvolver e implementar uma arquitetura de transformação digital numa unidade de mistura Banbury de uma fábrica de pneus, com integração vertical e horizontal baseada na pirâmide ISA-95. O objetivo foi melhorar a eficiência energética e do produto através da integração entre MES, ERP e sistemas SCADA, suportados por uma infraestrutura em nuvem. O estudo compara o desempenho produtivo e energético antes e após a digitalização, avaliando a eficiência global, tempos de paragem, desperdício e retorno económico do investimento.	O MES, implementado através do SAP ME/Mil, integra-se com ERP e SCADA, gerindo receitas, ordens de produção, rastreabilidade e controlo em tempo real. Atua como núcleo da digitalização, permitindo recolher e analisar dados de pressão, temperatura e consumo energético. Garante o fluxo contínuo de dados entre o chão de fábrica e a gestão, otimiza a execução de ordens, minimiza erros de dosagem e facilita intervenções dinâmicas nas receitas conforme condições ambientais.	- Integração vertical ERP-MES-conforme ISA-95, - Rastreabilidade total via códigos de barras, - Gestão dinâmica de 430 receitas com otimização contínua, - Redução de paragens e desperdício, - Melhoria da eficiência energética e operacional. - Elevado custo inicial de integração, - Complexidade técnica na implementação multinível, - Necessidade de competências digitais avançadas, - Dependência de VPN e conectividade em nuvem, - Infraestrutura centralizada por PLC único e SCADA WinCC.	- Integração ISA-95 com SAP ME/Mil e S4/HANA, - Estrutura em nuvem (DEV, QA, PROD) com VPN segura, - Recolha de dados via sensores de pressão, temperatura, consumo), - Estrutura de receitas dinâmica baseada em Big Data, - Automação centralizada por PLC único e SCADA WinCC.
			Indústria de produção de pneus - unidade de mistura Banbury.	O MES fornece dados históricos e em tempo real sobre a utilização de máquinas, progresso de lotes e tempos de ciclo, que alimentam o modelo DES do gémeo digital. Serve de elo entre o chão de fábrica, o ERP e o planeamento global (GRS), permitindo a recolha, limpeza e atualização contínua de dados. O MES garante a sincronização entre o sistema físico e o virtual, suportando o monitoring, a previsão de desvios e a validação das simulações do gémeo digital.	- Dependência da qualidade dos dados recolhidos (particularmente manuais), - Complexidade de integração entre múltiplos sistemas (ERP, PLM, - Necessidade de limpeza e pré-processamento intensivo de dados, - Limitações na automatização total das decisões no curto prazo.	- Modelo <i>Digital Twin</i> baseado em simulação de eventos discretos (DES), - Integração bidirecional MES->DT->ERP->PLM, - Fluxo de dados contínuo e sincronizado, - Apoio à decisão em planeamento e reprogramação, - Processamento e mining de dados históricos do MES.
<i>Towards the Implementation and Integration of a Digital Twin in a Discrete Manufacturing Context</i>	2024 Caso Industrial	Michela Lanzini; Ivan Ferretti; Simone Zanoni	Desenvolver um enquadramento conceptual para a implementação e integração de um gémeo digital (DT) num contexto de fabrico discreto, suportado em dados provenientes do MES e de sistemas empresariais (ERP, PLM). O objetivo é melhorar o planeamento da produção e a tomada de decisão, através da sincronização de dados de fluxo de materiais e da criação de um modelo de simulação de eventos discretos (DES) capaz de prever atrasos e propor replaneamentos. Pretende-se aumentar a pontualidade interna e a resiliência a perturbações operacionais.	Indústria transformadora de aço e componentes metálicos para construção.	Indústria transformadora de aço e componentes metálicos para construção.	Indústria transformadora de aço e componentes metálicos para construção.
			Desenvolver e validar o método Workplace Performance Measurement (WPM), uma solução digital de observação e análise do trabalho que recolhe dados de desempenho sem interferir com o processo produtivo. O objetivo é colmatar a falta de rastreabilidade digital em operações manuais, integrando dados de vídeo e sensores para alimentar sistemas MES e apoiar decisões de melhoria contínua e controlo automático, com base em Process Mining e Machine Learning.	O MES é o sistema de destino dos dados recolhidos pelo WPM, recebendo em tempo real informações sobre tempos, atividades, e parâmetros de execução. O WPM fornece dados precisos e atualizados dos dados de produção e master data, fortalecendo a rastreabilidade e a análise de desempenho. O MES usa essa informação para ajustar planos de produção, calcular tempos-padrão e apoiar o controlo automático de desempenho operacional.	- Integração de dados de observação digital com o MES, - Melhoria da qualidade e fiabilidade de dados de produção, - Rastreabilidade de tarefas e operações manuais, - Aumento da transparência e visibilidade do fluxo produtivo, - Suporte a decisões de melhoria contínua e controlo automático. - Necessidade de elevada capacidade de processamento de dados, - Requisitos de segurança e privacidade nas captações de imagem, - Complexidade na configuração dos sensores e módulos de análise, - Dependência de algoritmos de Machine Learning para precisão.	- Recolha automática de dados por vídeo, sensores e ferramentas IoT, - Análise combinada de Process Mining e Machine Learning, - Integração direta dos dados digitalizados no MES, - Redução de anomalias e ineficiências operacionais.

<i>A Holonic Approach for Manufacturing Execution System Design: An Industrial Application</i>	Pascal Blanc; Isabel Demongodin; Pierre Castagna	2008	Caso Industrial	Desenvolver e validar uma arquitetura holónica para o desenho e controlo de um MES orientado a produtos, aplicável a sistemas de fabrico complexos e personalizados. A abordagem propõe a utilização do modelo PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture) para organizar a produção em holons comunicantes e cooperativos, garantindo reconfigurabilidade, flexibilidade e robustez na execução. O objetivo é mostrar, num caso real, que um MES baseado em holons pode gerir a sincronização de ordens, a disponibilidade de recursos e a reação a perturbações em tempo real.	O MES atua como sistema de controlo descentralizado, coordenando holons de produto, de recurso e de ordem. Cere a execução das tarefas de produção e garante a sincronização temporal e de componentes entre diferentes células. O MES faz a ligação entre o ERP e o chão de fábrica, integrando processos de corte, montagem, inspeção e planeamento em tempo real. O controlo holónico assegura que as ordens com maior prioridade são executadas primeiro, minimizando desperdícios e tempos de paragem.	- Elevada flexibilidade e capacidade de reconfiguração, de coordenação descentralizada e reação a eventos aleatórios. - Sincronização automática de tarefas e recursos. - Integração direta com ERP e sistemas físicos. - Melhoria da rastreabilidade e redução de erros humanos. Complexidade de desenvolvimento e afirmação do sistema multi-agente. - Comportamento global emergente de difícil previsão. - Necessidade de ferramentas de simulação e validação adicionais. - Dificuldade de medição e quantificação dos ganhos em contexto real. - Estrutura PROSA com holons de produto, recurso, ordem e staff. - Comunicação e cooperação baseadas em agentes JADE. - Regras heurísticas de escalonamento "earliest by priority". - Mecanismos de sincronização e pré-empêstimo de componentes ("cannibalismo"). - Simulação discreta como ferramenta de validação e calibração.
				Indústria de fabrico de vidro laminado de segurança para o setor automóvel (AGP Glass, Brasil).	O MES atua como núcleo do sistema de execução, assegurando a recolha de dados em tempo real, o controlo do processo produtivo, a rastreabilidade das peças, a gestão documental e de manutenção, e a análise de desempenho, em ligação direta com o APS e o WMS.	- Rastreabilidade ponta-a-ponta por peça e ordem. - Integração vertical ERP-APS-MES e horizontal MES-APS-WMS. - Sequenciação e execução de coordenadas em tempo real. - Redução de erros manuais e maior fiabilidade dos dados. - Integração complexa entre múltiplos módulos e fornecedores. - Forte dependência de qualidade de dados e master data. - Ajustes frequentes exigidos pela elevada variabilidade de com serviços de dados unificados.
<i>Investigation of the Customized Furniture Industry's Production Management Systems</i>	Zhanwen Wu; Fei Zong; Feng Zhang; Jinxin Wang; Zhaolong Zhu; Xiaolei Guo; Pingxiang Cao	2023	Caso Industrial	Analisar a arquitetura, as funções e a integração dos sistemas de gestão da produção na indústria de mobiliário personalizado. O estudo examina a interoperabilidade entre ERP, MES, APS e WMS, propondo um modelo integrado para melhorar o planeamento, execução e logística. Pretende fornecer referências úteis para a construção de sistemas de informação em empresas de fabrico personalizado, promovendo a eficiência e a rastreabilidade em ambientes de produção complexos.		
<i>Overall Equipment Effectiveness-Related Assembly Pattern Catalogue based on Machine Learning</i>	Péter Dobrá; János Józvai	2023	Caso Industrial	Investigar como padrões associados ao indicador OEE podem ser identificados e organizados num Assembly Pattern Catalogue (APC) utilizando técnicas de Machine Learning. O estudo propõe um modelo de previsão que integra dados provenientes de MES, ERP e bases SQL, aplicando regressão MGCV para estimar e validar padrões de disponibilidade, desempenho e qualidade em linhas de montagem automóvel, com o objetivo de melhorar a eficiência produtiva e o planeamento.	O MES atua como principal fonte de dados históricos e operacionais, recolhendo informação sobre disponibilidade, desempenho, qualidade, tempos de paragem, refugos e unidades montadas. Esta informação é usada como base para a análise de padrões e para alimentar os modelos de previsão do OEE. O MES fornece dados em tempo real que, combinados com o ERP e registos SQL, suportam a construção do Assembly Pattern Catalogue e o desenvolvimento de algoritmos de aprendizagem supervisionada.	- Recolha contínua de dados de produção e eficiência. - Identificação automática de padrões de falhas e de desempenho. - Integração com ERP e bases de dados para análise preditiva. - Apoio à decisão através de indicadores em tempo real. - Dependência da qualidade e granularidade dos dados. - Necessidade de sincronização com múltiplas fontes (ERP, SQL, logs). - Complexidade na validação e atualização dos modelos de previsão. - Utilização de Machine Learning (regressão MGCV) para previsão de OEE. - Extração de padrões a partir de MES, ERP e SQL. - Definição de catálogos de padrões (APC) estruturados por disponibilidade, desempenho e qualidade.

<i>Overall Equipment Effectiveness Prediction with Multiple Linear Regression for Semi-automotive Assembly Lines</i>	Desenvolver um modelo de previsão do indicador OEE em linhas de montagem automóvel semi-automáticas, com base em regressão linear múltipla (<i>Multiple Linear Regression</i> – MLR). O estudo visa comparar quatro métodos de previsão (cumulativo, <i>fix rolling horizon</i>, <i>optimal rolling horizon</i> e combinado) utilizando dados reais de produção recolhidos do MES e bases SQL. O objetivo é avaliar o desempenho dos modelos e apoiar decisões de investimento e planeamento industrial com base em métricas quantitativas de precisão.	Indústria montagem de estruturas de assento.	Automóvel	O MES recolhe dados de produção em tempo real, incluindo parâmetros, tempos de ciclo, unidades produzidas e refugos. Serve como principal fonte de dados para o cálculo do OEE e para treinar os modelos de regressão. Através da integração com bases SQL e ERP, o MES disponibiliza séries temporais consistentes que permitem construir modelos preditivos e apoiar decisões estratégicas sobre capacidade e investimentos.	- Aplicação de Regressão Linear Múltipla (MLR) como técnica de Machine Learning. - Quatro abordagens: cumulativa, <i>fix rolling horizon</i>, <i>optimal rolling horizon</i> e combinada. - Avaliação dos modelos por MAE, MAPE, MSE e R² ajustado. - Integração de dados provenientes do MES e de bases SQL industriais.
<i>An IoT Platform for Production Monitoring in the Aerospace Manufacturing Industry</i>	Conceber, desenvolver e validar uma plataforma IoT para monitorização da produção no setor aeronáutico, automatizando a recolha de dados, o controlo de tempos de execução e a avaliação de atrasos. A arquitetura integra dados do MES, sensores/atuaadores e uma aplicação de visualização para apoiar o controlo produtivo. As interações entre componentes são formalizadas (Data Provider–MES, IoT Agent–sensores, Broker–IoT Agent–sensores, Broker–análise de atrasos são testados num cenário de prova de conceito com dados históricos de sete meses).	Indústria aeroespacial (linha de produção/asseblagem; caso Embraer Portugal).	O MES é a principal fonte corporativa de dados de ordens e operações: o Data Provider extrai estados do MES database e publica no broker; estes eventos alimentam a Delay Analysis e a aplicação de visualização (painéis de ordens, operações e estado global). O MES mantém a referência de tempos esperados, permitindo comparar tempo real vs. plano e sinalizar atrasos/adiantamentos de forma sistemática.	- Integração direta dos dados de produção no fluxo IoT (consistência e atualidade). - Base de comparação entre tempo real e plano, viabilizando análise de atrasos. - Suporte a dashboards operacionais (ordens, operações, estado global). - Redução de erros de recolha manual e maior fiabilidade informacional.	- Broker com subscrições/notificações para entidades Order/Operation/Progress Sensor. - Data Provider (consulta ao MES database) e IoT Agent (sensores/atuaadores). - Delay Analysis compara tempos atuais vs. esperados e atualiza estados. - Visualização e alarmes para suporte à decisão.
<i>Data-driven machine criticality assessment – maintenance decision support for increased productivity</i>	Desenvolver e validar um enquadramento <i>data-driven</i> para avaliação de criticidade de máquinas que apoie a priorização de manutenção com foco em produtividade. O método integra dados de MES (estados/tempos de máquina) e CMMS (falhas/planos), identifica janelas de oportunidade de manutenção (MOW) e orienta decisões de PM/RM. A proposta é testada em quatro casos industriais e validada por simulação de eventos discretos, avaliando impacto em <i>throughput</i> e práticas de manutenção.	Indústria automóvel (linhas automatizadas com máquinas/estações em série e buffers)	O MES fornece dados temporais dos estados de máquina para análise de gargalos e cálculo de <i>active period</i>, permitindo uma priorização de manutenção, perspetiva sistémica na priorização de manutenção. Em conjunto com o CMMS, suporta a identificação de MOW para planejar PM sem perda de produtividade e priorizar RM nas máquinas gargalo. O MES revela parâmetros não captados no CMMS e viabiliza atualização contínua do diagnóstico operacional.	- Apoio objetivo e sistémico à priorização de manutenção. - Detecção de gargalos baseada em dados reais de operação. - Identificação de MOW para executar PM sem penalizar <i>throughput</i>. - Melhoria da sincronização produção–manutenção. - Evidência parâmetros sub-reportados no CMMS.	- Integração MES–CMMS para decisão <i>data-driven</i>. - Algoritmo <i>active period</i> para detecção de gargalos. - MOW para calendarização de PM. - Priorização de RM focada no gargalo. - Validação por simulação de eventos discretos.

<i>Leveraging Industry 4.0 for Sustainable Manufacturing: A Quantitative Analysis Using FI-RST</i>	Quantificar o impacto das principais tecnologias da Indústria 4.0, nomeadamente MES, IIoT e Manufatura Aditiva, no desempenho da sustentabilidade das empresas de fabrico em Fujian. O estudo aplica o modelo Fuzzy Integration-Rough Set Theory (FI-RST) para avaliar contributos económicos, ambientais e sociais, identificando sinergias tecnológicas e fatores críticos que promovem a eficiência de recursos, a redução de resíduos e o bem-estar dos trabalhadores, com vista à criação de um modelo de avaliação sustentável e comparável entre setores industriais.	Indústria transformadora (têxtil, calçado, maquinaria, eletrónica e componentes automóveis).	O MES atua como elemento central na digitalização do chão de fábrica, assegurando a monitorização em tempo real, a otimização das decisões de produção e a integração com IIoT e AM. O sistema contribui para reduzir desperdícios de material e consumo energético, melhorando a rastreabilidade e o desempenho operacional das empresas avaliadas.	- Melhoria da eficiência de recursos e planeamento da produção. - Redução de resíduos e energia consumida. - Apoio à tomada de decisão com base em dados, sistemas legados, e Dependência da maturidade tecnológica da empresa. - Elevado investimento inicial. - Necessidade de competências digitais avançadas. - Dificuldade de integração com contributos económicos, ambientais e sociais. - Identificação de tecnologias-núcleo que potenciam a sustentabilidade.	- Integração entre MES, IIoT e AM para redução de emissões. - Aplicação do modelo FI-RST para quantificação de contributos económicos, ambientais e sociais. - Identificação de tecnologias-núcleo que potenciam a sustentabilidade.
	2024 Caso Industrial Qingwen Li, Waifan Tang e Zhaobin Li	2025 Caso Industrial Hai-nan Huang; Ting Qu; Xiao-hui Qiu; Lin Ma; Duxian Nie; Congdong Li	O estudo propõe uma solução de reconfiguração sincronizada de cadeias de montagem (SyncRSC), conduzida por uma plataforma industrial IIIP, que integra dados em tempo real de ERP, MES e sensores industriais. O modelo combina um mecanismo qualitativo de três estados com redes neuronais em grafo (GNN) e coordenação Lagrangiana aumentada, permitindo reconfiguração descentralizada e sincronizada de múltiplos níveis perante disrupções. O objetivo é aumentar a resiliência, flexibilidade e desempenho global das cadeias de montagem.	O MES desempenha a função de interface operacional inteligente dentro da plataforma IIIP, recolhendo e transmitindo dados de produção e manutenção em tempo real. Atua como elo entre os sistemas empresariais e o chão-de-fábrica, suportando a análise preditiva e a sincronização de decisões de reconfiguração. Os dados do MES alimentam o modelo GNN, permitindo prever efeitos de disrupções e otimizar a atribuição de recursos e tarefas nas fábricas participantes.	- Elevada complexidade do modelo computacional GNN. - Integração total ERP-MES-IIIP com dados em tempo real. - Apoio à decisão descentralizado e colaborativo. - Melhoria da resiliência e do tempo de resposta. - Requisitos elevados de interoperabilidade entre sistemas legados, aumentando para equilíbrio entre nós. - Dificuldade de generalização para outros sectores sem adaptação do modelo. - Integração vertical e horizontal via Industrial Internet Platform. - Reconfiguração sincronizada de cadeias multi-nível. - GNN para previsão de disrupções e propagação de decisões. - Coordenação Lagrangiana aumentada para equilíbrio entre nós. - Cooperação descentralizada entre fábricas interligadas.
<i>Improving the OEE and UPH Data Quality by Automated Data Collection for the Semiconductor Assembly Industry</i>	Desenvolver e implementar um sistema integrado de recolha automática de dados (ADC) baseado em comunicação entre equipamento e MES, destinado a melhorar a qualidade e fiabilidade dos indicadores OEE e UPH na indústria de montagem de semicondutores. O estudo visa eliminar discrepâncias entre perdas OEE registadas manualmente e as definidas nas normas SEMI E10/E79, assegurando recolha automática e tempestiva de dados de produção para suporte à decisão e avaliação de desempenho.	Indústria de montagem de semicondutores (wire bonding / backend assembly)	O MES integra-se com o sistema de comunicação do equipamento (via HSMS/SECS-II) e o controlador local (K-net server), permitindo recolher automaticamente tempos de produção e perdas OEE conforme a norma SEMI E10. O sistema ADC baseado em MES regista e valida os dados e provenientes dos equipamentos, garante consistência temporal, precisão e rastreabilidade. O MES assegura a agregação de dados e o cálculo automático de UPH por lote e produto, alimentando o repositório histórico para análises de melhoria contínua.	- Eliminação de perdas OEE desconhecidas (de 6% para 0%). - Recolha automática e fiável de UPH. - Melhoria da precisão e tempestividade da informação. - Apoio direto a decisões de melhoria e controlo de custos. - Complexidade inicial de integração com o sistema de comunicação HSMS/SECS. - Necessidade de formação e aceitação pelos operadores. - Possibilidade de erros de codificação de estados em fase inicial. - Integração MES-equipamento via High-Speed SECS Message Service (HSMS). - Estrutura ADC com deteção automática de estados e filtros de anomalias. - Validação simultânea de tempos OEE por comunicação direta e por input do operador. - Base de dados de UPH com filtros progressivos para melhoria de precisão.	- Integração MES-equipamento via High-Speed SECS Message Service (HSMS). - Estrutura ADC com deteção automática de estados e filtros de anomalias. - Validação simultânea de tempos OEE por comunicação direta e por input do operador. - Base de dados de UPH com filtros progressivos para melhoria de precisão.

Machine Learning-Integrated Digital Twins for Process Optimization in Industry 5.0	2025	Caso Industrial	Carlos Jefferson de Melo Santos, Ava Santana Barbosa, Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna	O estudo visa propor e validar um modelo híbrido que integra equações diferenciais ordinárias (ODEs) e algoritmos de aprendizagem automática (ML) num enquadramento de Gémeo Digital (DT) para otimizar processos numa planta de detergentes. A investigação procura aumentar a precisão preditiva, reduzir tempos de carga e melhorar a resiliência, sustentabilidade e centralidade humana em contexto industrial real, alinhado com os princípios da Indústria 5.0.	Indústria química (produção de detergentes).	O MES foi um elemento de integração central entre o SCADA e o ERP, permitindo a sincronização de dados em tempo real. Serviu de camada operacional do Gémeo Digital, gerindo ordens de fabrico, sequenciação e indicadores de desempenho e fornecendo dados para treino e validação dos modelos de ML e ODE.	- Integra dados de produção, planeamento e controlo (ERP-MES-SCADA). - Permite visualização e sincronização em tempo real. - Suporta decisões preditivas e automatizadas. - Reduz desvios e tempos de carregamento. - Melhora a rastreabilidade e a eficiência de recursos.	- Dependência da qualidade e consistência dos dados. - Integração complexa com sensores heterogêneos. - Falta de variáveis contextuais (pH, operador, etc.) limita real. - Apoio à decisão humana com previsões e simulações dinâmicas.	- Integração híbrida ODE + ML para otimização de processo. - Orquestração de dados entre SCADA, MES e ERP. - Aprendizagem contínua e correção adaptativa em tempo real.
				Apresentar e validar um sistema de execução da produção em tempo real, baseado em RFID, para uma PME fabricante de válvulas de motor. O objetivo é recolher dados fiáveis no chão de fábrica, disponibilizar visibilidade e rastreabilidade, e suportar planeamento e sequenciação em tempo quase real. O estudo descreve o enquadramento metodológico, a arquitetura do RT-MES, a reengenharia de processos e a integração progressiva com ERP, mostrando melhoras operacionais mensuráveis e orientações para replicação em fornecedores automóveis de menor dimensão.	Automóvel (fabrico de válvulas de motor; SME na China – Huaili Dengyun Auto Parts)	O MES atua como núcleo operacional do RT-MES, recebendo eventos RFID de materiais, operadores e máquinas, transformando-os em informação de WIP, estado de recursos e progresso de ordens. Suporta planeamento e sequenciação por job pools em hybrid flow shop, emissão/fecho de operações por leitura de cartão e atualização imediata de prioridades. Integra-se com ERP e armazenam para sincronizar necessidades de material, reduzir papel e aumentar a tempestividade da informação.	- Visibilidade e rastreabilidade de WIP e recursos em tempo quase real. - Planeamento/sequenciação com job pools e regras EDD/FIFO. - Dependência da infraestrutura RFID e qualidade de dados. - Custos e estrangulamentos de redução de erros. - Integração progressiva com ERP e tags e leitores (memória, colisões).	- Captura distribuída de dados via leitores RFID em cada máquina. - Middleware RFID e base de dados corporativa para consolidação. - Sequenciação por stage job pools e machine job pools em hybrid flow shop. - Ciclo PADRE: People-Analyse-Design-Reengineering-Evaluation.	- Captura distribuída de dados via leitores RFID em cada máquina. - Middleware RFID e base de dados corporativa para consolidação. - Sequenciação por stage job pools e machine job pools em hybrid flow shop. - Ciclo PADRE: People-Analyse-Design-Reengineering-Evaluation.
Improved Performance Monitoring and Maintenance Processes using new data systems, sensors, and digital modelling in Cold Mill Roll Shop at Tata Steel Ijmuiden	2023	Caso Industrial	J. Bernard; H. Bolt; M. Heijne; M. Kamper; J. Teerenstra; M. Geers; M. Bons; T. Mentink	Modernizar o ecossistema IT/OT do Roll Shop do laminador a frio, integrando aquisição de dados de alta frequência, plataforma IoT em nuvem para monitorização de OEE, condition monitoring baseado em sensores de vibração e um modelo digital do fluxo de rolos. Pretende-se aumentar a visibilidade operacional, reduzir paragens não planeadas e suportar o planeamento com base em dados históricos e em tempo quase real. O trabalho insere-se no projeto CyberMan4.0 e reporta a arquitetura de dados, resultados de OEE e a utilização de um modelo digital para optimização de capacidade.	Siderurgia - laminador a frio, oficina de rolos (Roll Shop) em IJmuiden (Tata Steel)	O MES/RSMS armazena dados de rolos e operações usados para construir datasets e alimentar o modelo digital do Roll Shop. O modelo será utilizado para otimizar a capacidade e apoiar o novo sistema MES no planeamento de operações e manutenção. Prevê-se a interligação do RSMS com a aquisição de dados (Iba) e com a plataforma Mindsphere para desbloquear mais dados e integrar indicadores OEE no suporte a decisão.	- Centraliza dados de rolos e operações para análise. - Suporta planeamento com base no modelo digital do fluxo. - Permite rastreabilidade e análise de causas de incidentes.	- Sistemas legados e formatos proprietários dificultam integração e normalização. - Dependência de conectividade robusta IT/OT e de qualidade de dados.	- Aquisição de dados de alta frequência com Iba-PDA/OFC-UA e envio para Mindsphere. - Condition monitoring com sensores Shock Pulse (10–20 kHz) e alarmística SPM. - Modelo digital do Roll Shop para simular transporte, manuseio e refinação.

<i>A Risk Management Framework for Industry 4.0 Environment</i>	2023 Caso Industrial László Péter Pusztai, Lajos Nagy, István Budai	O estudo propõe um quadro metodológico quantitativo de gestão do risco na Indústria 4.0, integrando indicadores de fiabilidade (MTBF, MTR) e métodos estocásticos de planeamento (Stochastic Critical Path Method) para otimizar a programação da produção. O objetivo é mostrar como os dados provenientes do MES podem ser utilizados para prever tempos de produção, melhorar a decisão e reduzir custos, com base em simulação Monte Carlo e programação linear aplicada a um caso real.	Fabrico de mobiliário por oficinas paralelas (produção paralelas)	O MES é descrito como componente central da Indústria 4.0, responsável pela monitorização e recolha de dados de produção em tempo real, integrando o chão de fábrica com o ERP. Os dados recolhidos suportam a análise de fiabilidade, a simulação em tempo real, e a planeamento de produção baseado em risco, permitindo maior previsibilidade e rastreabilidade dos processos.	- Permite recolha contínua e fiável de dados de produção. - Suporta a análise de fiabilidade e indicadores OEE. - Facilita decisões baseadas em dados (data-driven). - Integra monitorização e planeamento em tempo real. - Melhora a rastreabilidade e a transparência produtiva.	- Requer investimento elevado em sensores e integração de dados. - Dependência da disponibilidade e qualidade das medições. - Complexidade na análise e interpretação dos dados de fiabilidade. - Integração com outros módulos exige competências especializadas.	- Integração MES-ERP-chão de fábrica para recolha e modelação de dados. - Aplicação de indicadores de fiabilidade em simulação estocástica. - Planeamento de produção ajustado ao risco via programação linear. - Redução de incertezas e otimização de tempos de produção.
	<i>Importance of the Integrated Manufacturing Execution System for a Metallurgical Enterprise</i>	2022 Caso Industrial Serik Kurmanov	Indústria metalúrgica (ferro e aço, ferrosilício, cobre, alumínio e metais preciosos).	O MES integra sistemas de planeamento, controlo e execução, interligando ERP, APCS e chão de fábrica. Facilita a recolha de dados, o planeamento detalhado, a rastreabilidade e o controlo de qualidade em tempo real. Atua como núcleo da digitalização, permitindo decisões baseadas em dados, automação de processos, otimização de produção e aumento da produtividade global.	- Aumenta a produtividade e reduz custos operacionais. - Melhora a rastreabilidade e a qualidade do produto. - Automatiza o planeamento e monitorização da produção. - Reduz o ciclo de produção e o consumo energético. - Proporciona integração total com ERP e APCS.	- Elevado custo inicial de implementação. - Necessidade de formação técnica especializada. - Falta de padronização e integração entre sistemas antigos. - Dependência da infraestrutura de comunicação digital.	- Integração MES-APCS-ERP para controlo em tempo real. - Monitorização contínua de qualidade e desempenho. - Planeamento digital e automação de ordens de fabrico. - Gestão otimizada de recursos e redução de desperdícios.
<i>Research on Quality Control Application of Whole Process Intelligent Manufacturing in Steel Industry 4.0 Based on Big Data Analysis</i>	2022 Caso Industrial Feng Zhao; Chen Yin; Xiaoxiao Huo; Yingying Xu	O estudo visa conceber e aplicar um sistema de controlo de qualidade baseado em análise de Big Data para a indústria siderúrgica, através da integração de algoritmos de decisão (árvore C4.5 melhorada), monitorização estatística multivariada (MSPM) e análise Granger. Pretende-se evoluir de um controlo univariado para um modelo multivariado, compatível com o MES, que permita diagnosticar anomalias, reduzir falhas e apoiar a transição para a Indústria 4.0.	Siderúrgico — produção de chapa e laminados.	O MES é o núcleo de integração entre o ERP e o sistema de automação (PLC), recolhendo dados de centenas de sensores e sincronizando-os com o tempo real de processo. Atua como plataforma de monitorização e diagnóstico da qualidade, suportando algoritmos de aprendizagem e permitindo o controlo em tempo real de parâmetros críticos de produção.	- Permite transitar de monitorização univariada para multivariada. - Integra dados de sensores PLC em tempo real. - Melhora a precisão na deteção de falhas e anomalias. - Reduz trabalho manual e aumenta a rastreabilidade da qualidade. - Suporta decisões baseadas em dados e melhoria contínua.	- Elevada complexidade de integração com múltiplos PLCs. - Requer forte capacidade computacional e sincronização temporal rigorosa. - Necessita de algoritmos robustos face a grandes volumes de dados. - Dificuldade de adaptação do modelo a todas as linhas de processo.	- Integração de dados PLC via MES com sincronização temporal. - Análise de Big Data aplicada a controlo de processo multivariado. - Implementação dos algoritmos ZC4.5-MSPM-Granger Analysis. - Diagnóstico preditivo e otimização da qualidade em tempo real. - Base para modelos gêmeos digitais e controlo distribuído.
	<i>A cloud-based manufacturing control system with data integration from multiple autonomous agents</i>	2018 Caso Industrial Silviu Răileanu, Florin Anton, Theodor Borangiu, Silvia Anton, Maximilian Nicolae	Indústria genérica (validação em células robotizadas de manipulação e montagem).	O MES atua como núcleo de coordenação entre o nível de execução distribuído (dMES) e o agendador central em nuvem (SS). Gere o planeamento, a monitorização e o reescalonamento de ordens de fabrico, processa dados energéticos e de desempenho recolhidos em tempo real, e assegura a rastreabilidade e otimização das operações através de uma base de dados central e agentes locais.	- Integração contínua entre chão de fábrica e nuvem. - Elevada disponibilidade (High Availability) e tolerância a falhas. - Otimização simultânea de recursos e energia em tempo real. - Reconfiguração dinâmica de ordens em resposta a alterações. - Escalabilidade e suporte a grandes volumes de dados industriais.	- Complexidade na sincronização entre agentes e base de dados central. - Dependência da infraestrutura de nuvem privada e VPN seguras. - Risco de latência e perda de amostras na comunicação com dispositivos embêbedos. - Necessidade de elevada capacidade computacional para otimização contínua.	- Arquitetura semi-heterárquica de controlo (cloud-edge). - Integração de agentes JADE para coordenação descentralizada. - Base de dados central partilhada (MySQL cluster com replicação síncrona). - Planeamento e reescalonamento dinâmico via motor de otimização (ILOG CPLEX). - Redução da "nervosidade" de planeamento com janelas temporais controladas.

<i>The Implementation of ERP and MES Systems as a Support to Industrial Management Systems</i>	2018 Caso Industrial	Dalibor Bertić, Darko Stefanović, Bojan Lalić, Ilija Čosić	O estudo pretende analisar as necessidades e benefícios da integração entre os sistemas ERP e MES no contexto industrial, avaliando os processos de implementação e os impactos sobre o controlo e a monitorização da produção. A investigação examina a perceção dos utilizadores e o desempenho resultante da introdução de um MES num ambiente fabril automóvel com ERP pré-existente, validando melhorias no planeamento, qualidade e competitividade empresarial.	O MES atua como camada intermédia entre o ERP e os sistemas de controlo (SCADA), assegurando recolha e sincronização de dados de produção em tempo real. Facilita o planeamento, monitorização de capacidade, controlo de qualidade e manutenção, permitindo decisões informadas e integração vertical e horizontal dos fluxos produtivos.	- Melhoria do planeamento e controlo da produção. - Redução de documentação em papel. - Comunicação em tempo real com o ERP. - Aumento da eficiência e produtividade. - Suporte à manutenção preventiva. - Maior rapidez na análise de desempenho (KPI).	- Custo de implementação e integração elevado. - Necessidade de formação contínua dos operadores. - Resistência organizacional à mudança. - Dependência de sistemas compatíveis entre sistemas de ERP e MES. - Melhoria quantitativa no planeamento e qualidade de processo.	- Integração vertical e horizontal ERP-MES—chão de fábrica. - Recolha e tratamento de dados de produção em tempo real. - Mapeamento de fluxo de valor (VSM) antes e após implementação. - Melhoria quantitativa no planeamento e qualidade de processo.
	2016 Caso Industrial	Mukund Subramanivan, Anders Skoogh, Maheshwaran Gopalakrishnan, Atefeh Hanna	Desenvolver e validar um algoritmo baseado em dados em tempo real, utilizando períodos médios de atividade das máquinas, para deteção de estrangulamentos produtivos. O método visa substituir técnicas baseadas em simulação, explorando dados registados em sistemas MES para identificar gargalos de forma automática e contínua, promovendo decisões de manutenção e melhoria sustentadas em dados reais da produção.	O MES é a principal fonte de dados do estudo, registando estados das máquinas e carimbos temporais utilizados pelo algoritmo. Serve como infraestrutura para recolha e sincronização de dados de operação, permitindo a análise de desempenho, a identificação de gargalos e a priorização de atividades de manutenção e melhoria.	- Fornece dados em tempo real fiáveis para análise. - Permite identificar gargalos sem necessidade de modelos de simulação. - Facilita a monitorização contínua e a tomada de decisão baseada em evidência.	- Requer elevada qualidade dos dados registados. - Depende da consistência e limpeza dos registos históricos. - Exige integração correta entre sistemas e sincronização temporal.	- Análise de dados de máquina em tempo real através de algoritmos de média de períodos ativos. - Integração de MES como fonte central de dados. - Melhoria da priorização de manutenção e eficiência produtiva.
	Agent Learning in Autonomic Manufacturing Execution Systems for Enterprise Networking	Milagros Rolón, Ernesto Martínez	Propor e avaliar um MES autônômico (@MES) para redes empresariais, no qual agentes de encomenda e agentes de recurso aprendem políticas de decisão e estabelecem relações cliente-servidor com reprogramação emergente. O estudo incorpora aprendizagem por reforço (Q-learning individual e multi-agente), mede a robustez a perturbações e mostra, por simulação, a capacidade de adaptação e estabilidade do controlo distribuído. E ainda apresentado um caso de estudo de uma rede de produção de tintas para ilustrar a aplicabilidade.	O MES atua como mecanismo distribuído de planeamento detalhado e execução: liga a ERP/planeamento a sensores/atuadores de chão de fábrica (PLC, DCS), capta estados, e coordena agentes que negociam capacidade, preço e fiabilidade. Utiliza um Gantt dinâmico como quadro negro para partilha de estado, com reagendamento automático perante falhas/manutenção e recompensas.	- Rejeição robusta de perturbações e gestão de eventos não planeados. - Aprendizagem contínua das políticas (adaptação a custos/fiabilidade). - Escalonamento/emergência de planos sem necessidade de agenda pré-fornecida. - Compatível com redes multi-empresa e interesses "selfish".	- Dependência fina dos algoritmos de reforço e temperaturas (softmax). - Ausência de validação operacional integral em fábrica. - Predominância de simulação. - Complexidade de integração e necessidade de dados fiáveis e sincronizados.	- Agentes OA/RA com Q-learning e aprendizagem assíncrona. - Negociação cliente-servidor por preço/qualidade/fiabilidade. - Recompensas definidas matematicamente. - Gantt partilhado como mecanismo de coordenação e replaneamento. - Protótipo NetLogo para simulação generativa e análise de emergências.

<i>Development of Manufacturing Execution System with Production Modelling Approaches</i>	Yunqing Rao; Wei Zhou; Fei He	2010	Caso Industrial	O objetivo é desenvolver uma arquitetura configurável de MES baseada em tecnologia de workflow (WFMES) que permita modelar visualmente processos de produção e adaptar rapidamente parâmetros de fabrico. O sistema propõe uma estrutura modular composta por bibliotecas de processos, recursos, ordens e ferramentas, suportadas por um motor de workflow que gere eventos e regras ECA. Pretende-se reduzir custos de desenvolvimento e aumentar a flexibilidade de adaptação a alterações no produto, capacidade e qualidade.	Indústria automóvel – linha de montagem de motores de produção (ambiente de produção discreta).	O MES proposto atua como sistema configurável cliente/servidor, composto por módulos de modelação, planeamento e execução. Gera modelos de processos através de diagramas dirigidos acíclicos (DAG) e gere recursos, materiais e ordens via bibliotecas específicas. O motor de workflow executa as atividades segundo regras ECA, assegurando rastreabilidade de materiais, recolha de dados de qualidade e alocação dinâmica de recursos. Permite configurar e reutilizar modelos de processo sem reprogramação.	- Complexidade na criação e manutenção dos modelos XML/DAG. - Dependência de middleware e motor de workflow específico. - Limitações na integração direta com sistemas ERP. - Elevada exigência de conhecimento técnico para implementação prática em linha de montagem automóvel.	- Configuração rápida de novos produtos e linhas. - Redução de custos de desenvolvimento e implantação. - Rastreabilidade e recolha automática de dados de qualidade. - Arquitetura extensível e reutilizável baseada em workflow.
<i>Achieving e- Manufacturing: Multithread Control and Web Technology for the Implementation of a Manufacturing Execution System</i>	Arturo Molina; Armando Ramirez Santaella	2006	Caso Industrial	O estudo apresenta o desenvolvimento e implementação de uma solução de e-Manufacturing de baixo custo que integra Demand Flow Technology, MES e Digital Operational Method Sheets (OMS) num ambiente web-based. Pretende-se superar a ineficiência das instruções em papel, assegurando sincronização em tempo real entre ERP, MES e controlo de linha, melhorando a flexibilidade e a produtividade num contexto de elevada variedade de produtos e mudanças rápidas de modelo.	Indústria de iluminação (HID ballasts e lighting fixtures) – planta de montagem Make-to-Order (MTO).	O MES atua como sistema integrador entre o ERP (Man-PRO) e o controlo de chão-de-fábrica, sincronizando ordens, materiais e instruções de montagem digitais. Suporta OMS digitais em monitores ligados a servidores Linux multi-head, garantindo a entrega instantânea das instruções de trabalho; lista de materiais e controlo de qualidade em formato HTML. Inclui dashboard digital para supervisão da produção, permitindo a gestão em tempo real de ordens, produtividade e takt-time.	- Necessidade de manutenção contínua dos monitores e servidores. - Dependência de rede local estável e infraestrutura de baixo custo. - Requer disciplina de operação e adesão total dos operadores. - Elevado número de OMS a gerir em ambientes de alta variedade.	- Integração ERP–MES–Shop Floor num modelo web-based. - Digitalização de instruções (OMS) com controlo multi-head Linux. - Sincronização bidirecional de dados de produção e qualidade. - Dashboard digital para monitorização em tempo real da produção.
<i>An XML Process Model for Enterprise Applications</i>	Yu-Hui Tao; Tzung-Pei Hong; Sheng-I Sun	2004	Caso Industrial	O objetivo é desenvolver um modelo de processo para a implementação de XML em aplicações empresariais e na integração entre sistemas MES, ERP e PDM do Mechanical Industry Research Laboratories (MIRL). O modelo propõe sete etapas desde a análise de requisitos até à manutenção, abordando a definição de DTD e a geração de documentos XML para intercâmbio de ordens de trabalho. Visa padronizar a troca de dados internos e interorganizacionais segundo a norma RosettaNet e melhorar a interoperabilidade entre sistemas heterogéneos.	Indústria de semicondutores e alta tecnologia (Taiwan – MIRL, integração em 18 fábricas semicondutoras).	O MES atua como núcleo de integração intra- e interorganizacional, suportando a troca de dados entre ERP, APS e WIP via XML e IBM MQSeries. O sistema gera mensagens estruturadas com DTD definidas para ordens de trabalho, material e devoluções, permitindo consultas e atualizações de produção em tempo real entre unidades de fabrico e parceiros da cadeia de fornecimento. O MES assegura compatibilidade com RosettaNet para integração B2B.	- Dependência de definições DTD extensas e complexas. - Necessidade de atualização constante das versões XML no MES. - Complexidade na integração de manutenção de compatibilidade entre múltiplos sistemas. - Esforço elevado de modelação e documentação entre ERP e WIP em tempo real.	- Interoperabilidade entre sistemas ERP/MES/PDM. - Padronização de troca de dados com XML. - Redução de dependência de middleware proprietário. - Flexibilidade na integração de novos parceiros B2B.

<i>Virtual Analyzers: Identification Approach</i>	N. N. Bakhtadze	2004	Caso Industrial Indústria de processo contínuo (petróleo, química, energia, produção de vidro, alimentar e metalomecânica). O estudo define a estrutura o conceito de “Virtual Analyzer” como sistema algorítmico-inteligente que gera modelos em tempo real com base em dados atuais e históricos de processos industriais. Visa mostrar que estes algoritmos, baseados em identificação e métodos de inteligência artificial, constituem o núcleo analítico dos sistemas de execução de fabrico (MES) para controlo e optimização de processos contínuos, previsão de qualidade, diagnóstico de equipamentos e tomada de decisão inteligente.	O MES é descrito como o sistema de controlo de produção em tempo real que interliga todos os processos de negócio e fabrico. Atua como plataforma central para recolha e análise de dados, previsão da qualidade, programação da produção, diagnóstico de equipamentos e apoio à decisão. É também responsável pela coordenação entre ERP, SCM e sistemas laboratoriais, fornecendo informações detalhadas e decisões optimizadas baseadas em modelos inteligentes e adaptativos (Virtual Analyzers).	- Integração completa dos processos de negócio e fabrico. - Controlo em tempo real com base em dados analíticos e preditivos. - Optimização de qualidade, manutenção e planeamento. - Redução de custos e maior reatividade operacional. - Base inteligente para suporte à decisão.	- Elevada complexidade algorítmica e necessidade de especialistas. - Custos de desenvolvimento e manutenção de modelos VA. - Dificuldade de validação de modelos em contextos reais (redes neuronais, lógica difusa, algoritmos genéticos). - Dependência de dados fiáveis e infraestrutura de comunicação robusta.	- Identificação e modelação em tempo real de processos (soft sensors). - Integração de controlo, diagnóstico e previsão num núcleo VA. - Utilização de algoritmos de IA (redes neuronais, lógica difusa, algoritmos genéticos). - Controlo robusto e adaptativo baseado em identificação.
	Simon Oman; Robert Leskovaar; Bojan Rosi; Alenka Baggia <i>Integration of MES and ERP in supply chains: Effect assessment in the case of the automotive industry</i>	2017	Caso Industrial Cadeia de abastecimento automóvel (PME eslovena; dados recolhidos com participação de 56 membros do cluster) O estudo descreve o desenvolvimento de uma interface bidireccional baseada em IDoc, a metodologia de avaliação com o modelo de referência de valor (VRM) e compara resultados antes e depois da integração, para comprovar melhorias em indicadores-chave de desempenho.	O MES (HYDRA) realiza recolha e consolidação de dados do chão-de-fábrica (SFC), incluindo parâgens, refugo e tempos de ciclo, e devolve informação um agregada ao ERP para suporte à decisão em tempo quase real. Na arquitetura proposta, o ERP lidera a emissão de ordens e encomendas. MES confirma execuções e estados operacionais via troca bidireccional de mensagens IDoc, reduzindo entradas manuais e erros, e alinhando planeamento e execução.	- Redução de atrasos de troca de dados (de 24 h por e-mail para ~8 h, duplicações/erros). - Menos duplicações/erros. - Melhorias de pontualidade de entrega e do ciclo de atendimento de encomendas. - Suporte a decisão em tempo real. - Gestão controlada da mudança na SC.	- Dependência de middleware/IDoc. - Ausência de bibliotecas de desenvolvimento “tipo SAP” no Dynamics NAV (necessidade de desenvolvimento em C/AL). - Ganhos inferiores ao esperado em algumas métricas (p. ex., tempo de ciclo de produção 18 %, custos de encomendas defeituosas 19 %). - Suscetibilidade a erros humanos nos processos de encomenda.	- Interface ERP–MES baseada em IDoc/RFC. - GUI embebida no ERP. - Integração orientada por ISA-95/B2MML. - Avaliação com VRM (velocidade, custos, activos). - Agregação de benefícios por média ponderada. - Troca de dados bidireccional e eventos de gatilho (semit-automáticos/automáticos).
<i>Integration of Information for Manufacturing Shop Control</i>	Zdravko Tesić; Vojin Mitrović; Ilija Čosić; Danijela Lalić	2010	Caso Industrial Indústria metalomecânica (produção de rolamentos). Apresentar um modelo de integração da informação para controlo de produção em fábricas com elevada variabilidade, através da ligação entre sistemas ERP, MES e controlo de máquinas. O estudo descreve o desenvolvimento do módulo MP-Integrator, concebido para interligar planeamento, escalonamento e execução, recolhendo dados de máquinas NC e enviando-os em tempo real para o sistema central. O objetivo é mostrar uma integração completa entre os níveis de gestão, planeamento e chão de fábrica, garantindo rastreabilidade e comunicação bidireccional.	O MES atua como elo intermédio entre o ERP e o controlo de chão de fábrica, integrando dados provenientes dos equipamentos NC e PLC. Através do módulo ERP, MES e controlo de máquinas, MP-Integrator, o MES gere ordens de fabrico, estados das máquinas, transferências de programas NC e recolha automática de dados de produção. Este papel permite a sincronização de ordens a monitorização do progresso das operações e a atualização contínua da base de dados de produção, assegurando a coerência entre planeamento e execução.	- Melhorias da integração vertical entre ERP, MES e controlo de máquinas. - Transferência automática de programas NC e recolha de dados de produção. - Acesso em tempo real a estados e métricas de produção. - Redução de perdas de dados e tempo de resposta. - Aumento da rastreabilidade e consistência informacional.	- Dependência de infraestruturas de rede e protocolos proprietários. - Comunicação via Ethernet TCP/IP e interfaces RS-232. - Necessidade de hardware adicional (Two Way Serial Switch). - Integração limitada a manual. - Ligação de controladores SINUMERIK-3T e HUNOR 721. - Base de dados central em MS SQL Server para sincronização contínua.	- Módulo MP-Integrator como mediador entre ERP, MES e máquinas NC. - Comunicação via Ethernet TCP/IP e interfaces RS-232. - Integração com painéis Festo Front End Display para recolha a manual. - Integração de controladores SINUMERIK-3T e HUNOR 721. - Base de dados central em MS SQL Server para sincronização contínua.

<i>Research on Evaluation System and Method of MES System for Intelligent Manufacturing</i>	Desenvolver um sistema de avaliação para MES no contexto da manufatura inteligente, combinando o modelo de rede neural GA-BP com o método generativo SeqGAN para criar um modelo quantitativo de avaliação do nível de maturidade de sistemas MES, classificando a evolução da Indústria 1.0 à 4.0 e validando a eficácia do modelo através de um caso real numa empresa de ferramentas elétricas.	Indústria elétrica (montagem de ferramentas e fabricação).	2024 Caso Industrial	Muhan Li, Yusheng Jiang, Ni Liang	O MES atua como núcleo do sistema de fabrico inteligente, recolhendo dados em tempo real de equipamentos e processos, ligando ERP, sensores e controlo de chão de fábrica. Facilita a gestão de produção, qualidade, inventário e planeamento, permitindo o controlo e rastreabilidade de todas as operações. Serve como base de dados para o modelo de avaliação da maturidade digital e de desempenho industrial.	- Recolha automatizada e contínua de dados operacionais. - Integração vertical entre níveis de planeamento e controlo. - Otimização do agendamento de produção. - Monitorização em tempo real e rastreabilidade de rastreabilidade total. - Suporte à decisão através de análise baseada em dados.	- Elevada dependência de conectividade e sincronização de dados. - Complexidade no desenho da base de dados e manutenção. - Necessidade de elevada fiabilidade na calibração e integração de sensores. - Expansão de amostras via SeqGAN para robustez do modelo. - Correlação $R > 0,99$ entre saída prevista e real.	- Estrutura de arquitetura em sete camadas (B/S). - Avaliação baseada em indicadores de 1.º e 2.º nível. - Treino de modelo GA-BP otimizado por algoritmo genético. - Expansão de amostras via SeqGAN para robustez do modelo. - Correlação $R > 0,99$ entre saída prevista e real.
<i>Application of MES-MOM for Industry 4.0 supply chains: A cross-case analysis</i>	O estudo procura identificar fatores-chave e desafios na implementação de sistemas MES/MOM conectados ao IIoT para aumentar a flexibilidade e reconfigurabilidade das cadeias de abastecimento da Indústria 4.0. Analisa seis casos industriais para compreender como as empresas integram TI/TO, utilizam padrões ISA-95 e APIs abertas, e como a digitalização e interoperabilidade contribuem para a flexibilidade operacional e a integração fim-a-fim das cadeias produtivas.	Diversos: alimentares (latínios e carnes), equipamentos energéticos, turbinas eólicas, atuadores elétricos e brinquedos plásticos (discreto e processo).	2023 Caso Industrial	Soujanya Mantravadi, Jagjit Singh Srati, Charles Møller	O MES/MOM é o núcleo de integração TI/TO, responsável pela recolha e normalização de dados de chão-de-fábrica, pela visibilidade em tempo real e pela interoperabilidade entre ERP, PLCs e plataformas IIoT. Funciona como elemento central da arquitetura ISA-95 para rastreabilidade, controlo distribuído, modulação digital e apoio à decisão baseada em dados.	- Facilita a interoperabilidade entre TI e TO. - Melhora a rastreabilidade e visibilidade em tempo real. - Permite redução de tempos de mudança e planeamento dinâmico. - Suporta decisões baseadas em dados e coordenação entre fábricas.	- Complexidade elevada de integração com sistemas legados. - Custos iniciais significativos e dependência de padronização. - Falta de maturidade organizacional para transformação digital. - Heterogeneidade de equipamentos e protocolos.	- Integração TITO através de IIoT e ISA-95. - Utilização de arquiteturas modulares e micro-serviços. - Normalização de dados via OPC UA, MQTT e APIs abertas. - Reconfigurabilidade e flexibilidade operacional a nível de rede.
<i>Implementation of Trusted Manufacturing & AI-based Process Optimization into Microelectronic Research Environments</i>	O estudo visa desenvolver e validar um conceito de "Trusted Manufacturing" baseado numa cadeia de confiança (Chain of Trust – CoT) e em otimização de processos com inteligência artificial, aplicados à produção distribuída de sistemas microeletrónicos. Pretende-se criar uma arquitetura segura e flexível que assegure a integridade dos dados e processos em diferentes locais de fabrico, promovendo simultaneamente a digitalização e o controlo inteligente de qualidade.	Microeletrónica e eletrónica de alta fiabilidade (controladores para energia, mobilidade e aplicações críticas).	2021 Caso Industrial	K.-F. Becker, S. Voges, P. Fruehauf, M. Heilmann, S. Nerretter, R. Blank, M. Erdmann, S. Gottwald, A. Hofmeister, M. Heshe, M. Thies, S. Mehrafsun, R. Fust, E. Beck, J. Pawlikowski, B. Schröder, C. Voight, T. Braun, M. Schneider-Ramelow	O MES desempenha o papel central de recolha e integração dos dados de produção provenientes de sensores, equipamentos e sistemas de execução distribuídos, suportando a rastreabilidade, a análise inteligente e a otimização dos processos. Funciona como núcleo de ligação entre o chão de fábrica, os módulos de edge computing e as aplicações de IA na nuvem.	- Permite digitalização segura dos fluxos de produção em diferentes locais. - Suporta a rastreabilidade integral dos produtos e processos. - Facilita a integração entre dados operacionais e modelos de IA para otimização contínua.	- Complexidade de integração entre sistemas heterogêneos. - Elevadas exigências de segurança cibernética e de certificação de confiança. - Requer investimento considerável em infraestrutura de comunicação e edge computing.	- Implementação de uma Chain of Trust baseada em elementos seguros (Smart Secure Items). - Integração de Edge Computing Modules (ECM) e comunicação segura com sistemas de IA em nuvem. - Aplicação de machine learning híbrido (data-driven e model-based) para otimização de processos. - Aumento da confiabilidade e flexibilidade do fabrico distribuído.

<i>Lean Manufacturing and Industry 4.0: Unveiling Trends, Applications, and Global Impacts in Manufacturing Through Comprehensive Literature Review</i>	Fornecer uma revisão sistemática sobre a integração Lean-Indústria 4.0, identificando tendências, combinações recorrentes e impactos reportados na eficiência, custos, suporte à decisão e uso de dados em tempo real. A pesquisa levantou 250 publicações em Scopus e analisou 44 em profundidade, caracterizando relações como MES-Process Mapping e OEE-I4.0 e discutindo lacunas e oportunidades para investigação futura.	Indústria transformadora (vários subsetores: síntese transversal de estudos).	Enquadrado como tecnologia basilar para recolha, armazenamento e análise de dados de produção em tempo real, potenciando a rastreabilidade, visibilidade e melhoria contínua. Surge frequentemente associado a Process Mapping, JIT/Kanban e OEE, atuando como conector entre chão de fábrica e decisão operacional.	- Integra dados de chão de fábrica para decisão. - Melhora eficiência e gestão de recursos. - Aumenta visibilidade, rastreabilidade e previsão. - Potencia iniciativas Lean quando combinado com OEE/JIT/Kanban.	- Custos de implementação e curva de aprendizagem em I4.0. - Integração complexa em ecossistemas heterogêneos. - Dependência de dados fiáveis e normalizados. - Presença de IA, Simulação, Cloud e Big Data.	- Paramentos recorrentes: MES-Process Mapping, OEE-I4.0 com maior incidência em IoT e CPS.
<i>An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes</i>	Propor e implementar uma arquitetura para monitorização e controlo de processos industriais num MES suportado por um gêmeo digital imersivo, seguindo a ISO 23247. A solução integra CPS, IoT, OPC UA, AR e VR, de modo a recolher estados em tempo real, manter modelos digitais sincronizados e permitir interação imersiva para supervisão, simulação e atuação. A validação decorre num laboratório de Indústria 4.0 (Festo CP-Factory/CP-Lab), comparando o desempenho face a um MES convencional e medindo ganhos em tempos de resposta, diagnóstico de falhas e logística interna.	Ambiente laboratorial de Indústria 4.0 (fábrica discreta, Linhas Festo CP-Factory/CP-Lab) com robot móvel e estações de montagem/inspeção.	O MES é o núcleo de execução: recebe dados de OPC UA provenientes de PLCs/estações, sincroniza o gêmeo digital (modelo 3D e estados), disponibiliza ARVR para supervisão/controlo e fecha o ciclo monitorização-decisão-ação. Em conjunto com o DT, o detalhe descreve erros operacionais, acelera o diagnóstico e suporta o replaneamento (p. ex., navegação do robô e parametrização de distâncias de evasão). O MES atua como servidor OPC UA e integra <i>middleware</i> (Node-RED) e cloud para persistência e aplicações imersivas.	- Interoperabilidade entre plataformas e subistemas de controlo. - Diagnóstico e deteção de problemas em tempo real com suporte imersivo. - Visualização e controlo AR/VR com dados reais. - Complexidade de integração multi-plataforma (Unity, Node-RED, Firebase, PLC/OPC UA). - Ausência de validação em ambiente industrial de grande escala.	- Dependência de conectividade e latência entre OPC UA, middleware e cloud. - Esforço de modelação 3D e streaming e persistência de dados. - Manutenção do alinhamento físico-digital. - Complexidade de integração multi-plataforma (Unity, Node-RED, Firebase, PLC/OPC UA). - DT sincronizado a partir de atributos observáveis (ISO 23247). - Ausência de validação em ambiente industrial de grande escala. - Robot móvel com Lidar para mapeamento e desvio de obstáculos.	- OPC UA (cliente/servidor) para aquisição e publicação de estados. - Node-RED e Firebase para streaming e persistência de dados. - Unity + AR/VR para visualização/controlo imersivos. - DT sincronizado a partir de atributos observáveis (ISO 23247). - Ausência de validação em ambiente industrial de grande escala. - Robot móvel com Lidar para mapeamento e desvio de obstáculos.
<i>Service-Oriented Architecture and Cloud Manufacturing</i>	Conceber, implementar e verificar uma arquitetura industrial baseada em SOA e computação em nuvem que integre CPS, IoT, SCADA e MES, assegurando aquisição de dados em tempo real, alarmística, controlo remoto e visualização. A proposta inclui um gateway/mediador (eWON) com serviços atómicos e compostos e uma nuvem privada (Windows Azure Pack) para serviços SCADA/MES (incluindo OEE). A validação é realizada em duas divisões laboratoriais (estufa e linhas de montagem), comparando acessibilidade, integração e qualidade de serviço.	Ambiente laboratorial de fabrico discreto e automação (linhas de montagem simuladas e estufa), com PLC Rockwell, industrial router e nuvem privada.	O MES surge como serviço na nuvem, consumindo dados do field via gateway/mediador SOA e OPC/HTTP/JSON; disponibiliza cliente Windows tablet para monitorização de linhas, definição de KPI/OEE e visualização de estados. Atua em cooperação com SCADA/HMI, armazenando histórico em SQL e expondo serviços para integração com aplicações móveis e terceiros (ex.: Google server) num cenário multi-tenant.	- Interoperabilidade vertical/horizontal via SOA. - Acesso remoto seguro (VPN) a dados e comandos. - Serviços MES na nuvem (OEE, HMI) com armazenamento SQL. - Suporte multi-tenant por divisão atómicos/compostos. - Redução de tráfego via comunicação event-based.	- Validação limitada a ambiente laboratorial (ausência de prova industrial). - Dependência de conectividade e latência cloud-edge. - Complexidade de modelação/gestão de serviços atómicos/compostos. - Segurança HTTPS não utilizada no protótipo (opção por VPN).	- Gateway/mediador SOA (eWON) com serviços: get/set tag, alarm ACK, histórico, eventos. - Nuvem privada (Windows Azure Pack) com serviços SCADAMES e base MSSQL. - Comunicação JSON/HTTP e VPN (eFive/OpenSSL). - Clientes móveis/Windows para HMI e MES (KPI/OEE). - Comunicação event-based para reduzir chamadas e custo de rede.

<i>Making Cognitive Ergonomics in the Human-Computer Interaction of Manufacturing Execution Systems Assessable: Experimental and Validation Approaches to Closing Research Gaps</i>	Conceber um experimento padronizado que tome avaliável a ergonomia cognitiva na interação humano-computador do MES, analisando o impacto de diferentes níveis de carga de informação na interface do operador. O desenho segue Design of Experiments, com três cenários de GUI (alta, média, baixa carga informacional) e medição objetiva e subjetiva do esforço mental através de GSR, frequência cardíaca, temperatura corporal e NASA-TLX. O objetivo é disponibilizar um protocolo "pronto a executar" e um método de validação para estudos comparativos e futuras extensões a ambientes industriais.	2024 Caso Real	Andreas Dörner; Marek Bures; Michal Simon; Gerald Pirkl	O MES (SAP ME Production Operator Desk) fornece a interface HMI/GUI com diferentes cargas de informação, por onde os operadores iniciam e confirmam ordens. Serve de plataforma para observar o impacto de desenho de interface na carga mental e no desempenho, permitindo recolher eventos, tempos e estados e suportando variações de interação (toque e alternativas futuras). O MES constitui o contexto de teste onde se relacionam métricas fisiológicas e percecionais com o desenho da interface.	- Design of Experiments com três níveis de carga informacional na GUI. - Medição GSR, frequência cardíaca e temperatura + NASA-TLX. - Validação com abordagem cromática tipo "cubo" combinando medidas objetivas e subjetivas. - Ênfase no delta de GSR e FC.
<i>The Industrial Management of SMEs in the Era of Industry 4.0</i>	Analisar de que forma as pequenas e médias empresas podem adotar e beneficiar das tecnologias da Indústria 4.0, identificando impactos na gestão industrial, exigências organizacionais e tecnológicas, e comparando soluções digitais emergentes com sistemas tradicionais. O estudo sintetiza oportunidades e limitações para PME, clarifica o papel de sistemas legados, e propõe direções para transições graduais com base em casos reportados na literatura e em observações de terreno, enfatizando custos, competências, interoperabilidade e criação de valor.	2017 Caso Real	Alexandre Moëuf; Régis Pellerin; Saïd Lamouri; Samuel Tamayo; Yves Barbaray	O MES é referenciado como sistema legado de execução e rastreabilidade com reconhecidas vantagens operacionais, mas frequentemente percebido como caro, rígido e exigente para PME. No enquadramento da Indústria 4.0, as PME tendem a privilegiar soluções modulares e escaláveis com IoT e computação em nuvem, que replicam parcialmente funções do MES com menor custo inicial e maior flexibilidade, mantendo a necessidade de garantir qualidade de dados, normalização e integração com o ERP.	- Rastreabilidade e visibilidade do chão de fábrica, elevados para PME. - Rigidez funcional e custos de customização. - Integração complexa com legados heterogêneos. - Suporte a qualidade, desempenho e conformidade. - Integração vertical com ERP e sistemas de controlo. - Exigência de competências técnicas especializadas. - Comparação entre arquiteturas tradicionais e soluções I4.0 modulares. - Migração gradual de capacidades para IoT/Cloud. - Ênfoque em escalabilidade, pay-as-you-go e interoperabilidade. - Reforço de decisões baseadas em dados para PME.
<i>Assessing to what extent smart manufacturing builds on lean principles</i>	O estudo analisa em que medida a adoção de tecnologias de fábrica inteligente depende da implementação de princípios lean. Procura determinar se a presença de práticas lean é condição necessária para a adoção de tecnologias inteligentes e como esta relação afeta o desempenho operacional (qualidade, entrega, flexibilidade e custo). A investigação baseia-se em dados de empresas industriais neerlandesas, avaliando empiricamente os padrões de adoção e as interdependências entre lean e "smart manufacturing".	2022 Caso Real	Jos A.C. Bokhorst, Wilfred Knol, Jannes Slomp, Thomas Bortolotti	O MES é tratado como um dos componentes principais do fabrico inteligente, representando a ligação entre os dados de chão de fábrica e o controlo operacional. O estudo mostra que a implementação do MES requer um nível elevado de coordenação em tempo real. Aumento da eficiência e redução de custos operacionais quando combinado com práticas lean. - Suporte à integração de processos e fluxos de informação. - Melhorias da rastreabilidade e da complexidade de implementação em PME. - Benefícios limitados se a estrutura lean não estiver consolidada. - Elevada dependência de uma base lean pré-existente. - Investimentos iniciais de desenvolvimento de custo e qualidade quando sustentados por práticas lean. - Ausência de lean impede o aproveitamento dos benefícios do MES.	- Relação de complementaridade e dependência entre lean e smart. - O MES e outras tecnologias inteligentes reforçam o desempenho de custo e qualidade quando sustentados por práticas lean. - A ausência de lean impede o aproveitamento dos benefícios do MES.

<i>Virtual Factory Model</i> <i>Development for AI-Driven Optimization in Manufacturing</i>	2025 Caso Real Tónis Raamets; Kristo Kariust; Aigar Hermaste; Karolín Kelpman	Desenvolver um modelo de fábrica virtual para otimização do OEE numa unidade de fabrico de madeira, integrando simulação digital e análise com técnicas de inteligência artificial. Pretende avaliar layouts e fluxos de produção na fase de conceção, identificar gargalos e apoiar decisões de investimento com base em dados reais recolhidos em tempo quase real através do MES. A abordagem combina modelação em STPS, recolha contínua de métricas operacionais e análise por clustering para orientar melhorias sem perturbar operações existentes.	O MES (DIMUSA) assegura recolha e visualização em tempo real de KPIs (disponibilidade, desempenho, qualidade, OEE) por máquina, alimentando o modelo de fábrica virtual/digital twin para garantir fidelidade e suporte monitorização contínua e atualização dinâmica. As métricas históricas e online integram dados no DT para suportar a identificação de gargalos e a avaliação de cenários simulados, permitindo a melhoria a precisão do planeamento e da decisão de investimento, ajustar recursos e equilibrar linhas antes de alterações físicas.	- Fornecedor dados reais de disponibilidade, desempenho, e OEE. - Suporta monitorização contínua e ajustes imediatos de workflow. - Integração de dados no DT para robusta MES-DT/STPS. - Exigência de competências de simulações fidedignas. - Melhora a precisão do planeamento analíticas e de modelação. - Identificação de gargalos e de recursos/estações.	- Modelação em Siemens Tecnomatix Plant Simulation da (STPS) com DT de fábrica. - Recolha em tempo real via MES de KPIs (OEE). - K-means (k=5) determinado pelo método do elbow para clustering de OEE. - Identificação de gargalos e de recursos/estações.
<i>Prediction of Overall Equipment Effectiveness in Assembly Processes Using Machine Learning</i>	2024 Caso Real Péter Dobrá; János Józvai	Determinar quais combinações de métodos de aprendizagem automática melhor predizem o OEE em linhas de montagem semi-automáticas, usando dados reais obtidos do MES. O estudo compara nove algoritmos supervisionados e propõe um esquema de alternância entre dois modelos para reduzir o erro de previsão, avaliando o desempenho com RMSE em janelas deslizantes (treino de 8 semanas, teste de 6 semanas).	Automóvel - linha de montagem de estruturas de assento: 15 postos, takt time 60 s, dois turnos	- Disponibiliza dados reais e contínuos de OEE e variáveis de processo. - Automatiza medição/monitorização em tempo real para planeamento e gestão. - Permite construir datasets robustos para treino/validação de modelos. - Alimentam os modelos e a avaliação preditiva.	- Abordagem de janela deslizante: treino 8 semanas (80 turnos), teste 6 semanas (60 turnos). - Dependência da qualidade e consistência dos registos por turno. - Limitações de algoritmos para reduzir RMSE. - Alternância entre dois modelos para reduzir RMSE e comparação média entre combinações.
<i>Exploring Key Factors for Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) within the Framework of Industry 4.0 for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) in the Manufacturing Sector</i>	2024 Caso Real Caroline Gomes, Eduarda Busanello, Bruno Padilha, Laura Visintainer Lerman, Verónica Maurer Tabim	O estudo analisa os fatores que influenciam a adoção de sistemas MES por pequenas e médias empresas (PME) no contexto da Indústria 4.0. Utiliza o modelo de difusão da inovação (DOI) e o enquadramento tecnologia-organização-ambiente (TOE) para compreender as dimensões tecnológicas, organizacionais e externas que condicionam a adoção. O objetivo é propor um modelo conceptual que sirva de guia estratégico para superar barreiras e apoiar a decisão de implementação do MES em PME industriais.	PME do setor transformador (embalagens, borracha, papel e plásticos).	- Melhorias da eficiência operacional e produtividade. - Integração entre ERP e chão de fábrica - Aumento da rastreabilidade e da visibilidade de processos. - Apoio à tomada de decisão baseada em dados. - Flexibilidade e personalização conforme o setor industrial.	- Elevado custo inicial de implementação. - Falta de cultura digital nas PME. - Necessidade de formação e capacitação da equipa. - Resistência organizacional à mudança. - Integração complexa com sistemas legados. - Adoção do MES estruturada pelos modelos DOI e TOE. - Integração tecnológica, organizacional e ambiental. - Criação de frameworks de maturidade digital para PME. - Redução de barreiras de implementação e aumento da adesão à Indústria 4.0.

<i>Companies' Perception toward Manufacturing Execution Systems</i> Adil Aranjia, Oualid Kamach, Rachid Elmezziane 2021 Caso real Avallar a percepção das empresas industriais sobre os sistemas MES e os fatores que influenciam a sua utilidade percebida, considerando o perfil da empresa e as capacidades de integração do sistema com outras aplicações empresariais. O estudo pretende identificar quais os módulos e funcionalidades mais valorizados e como a integração com ERP, MRP e SCADA afeta o uso efetivo e os benefícios obtidos.	Multissetorial (automóvel, farmacêutico, alimentar, metalúrgico, plásticos, papel, vidro e transporte). Indústria alimentar engarrafamento. 2018 Caso Real Kamil Daniewski; Ewelina Kosicka; Dariusz Mazurkiewicz <i>Analysis of the Correctness of Determination of the Effectiveness of Maintenance Service Actions</i> Verificar a correção do cálculo e da interpretação dos indicadores de eficácia da manutenção (MTTF, MTBF, MTTR e OEE) numa empresa alimentar que implementou um MES. Pretende-se identificar erros de classificação de eventos e de algoritmos de cálculo, avaliar o impacto na leitura do desempenho e determinar se a utilização correta dos indicadores pode aumentar a eficácia das ações de manutenção. Inclui diagnóstico das causas e recomendações para a definição e utilização adequada dos indicadores.	O MES atua como sistema de orquestração da produção, assegurando a ligação entre o nível de gestão (ERP/MRP) e o nível operacional (SCADA). Garante a recolha, de rastreabilidade e análise de dados de produção, bem como o controlo de ordens, qualidade e acompanhamento das ordens de desempenho. No estudo, é tratado como o elemento que traz a maturidade digital e o grau de integração tecnológica das empresas marroquinas. Sistema fonte de dados e relatórios operacionais, responsável por registar estados de máquina, classificar eventos e calcular indicadores (OEE, MTTR, MTBF, MTTF). Os autores auditam relatórios gerados pelo MES, identificando problemas de parametrização e de visualização que distorcem a avaliação da eficácia da manutenção e a tomada de decisão. Indústria alimentar engarrafamento. 2018 Caso Real Mukund Subramaniam, Anders Skoogh, Hans Salomonsson, Pramod Bangalore, Maheshwaran Gopalakrishnan <i>Data-driven algorithm for throughput bottleneck analysis of production systems</i> O estudo tem como objetivo propor e validar um algoritmo descritivo e diagnóstico baseado em dados reais de sistemas de produção para deteção de estrangulamentos de <i>throughput</i>. O método fundamenta-se na teoria do "período ativo" e utiliza dados provenientes do sistema MES para identificar gargalos e compreender os seus tipos, permitindo decisões rápidas e fundamentadas. Pretende-se substituir métodos baseados em simulação por abordagens data-driven, aumentando a fiabilidade e aplicabilidade industrial.
		O MES atua como fonte central de dados de máquina, recolhendo e registando automaticamente estados operacionais e tempos de atividade. Os dados do MES são utilizados pelo algoritmo para calcular percentagens de períodos ativos, testar significância estatística e detetar gargalos de produção em tempo real. O MES é, assim, o elemento que permite a integração dos dados de chão de fábrica no processo de decisão e otimização do <i>throughput</i>.

<i>Integration of Information Technology and Automation: Facilitators and Barriers</i>	O objetivo é analisar os facilitadores e barreiras da integração entre Tecnologia da Informação (IT) e Tecnologia de Automação (AT) em ambientes industriais, destacando modelos de integração (CIM, MESA e ISA-95) e uma aplicação industrial num terminal portuário automatizado. Pretende-se identificar como a integração vertical ERP–MES–PLC potencia a rastreabilidade, a eficiência e a tomada de decisão, bem como quais são os principais entraves organizacionais e tecnológicos nesta integração.	Logística portuária e armazenagem de graneis sólidos (fertilizantes e enxofre)	2010 Caso Real	Claudia Tomie Yukishima Züge; Sérgio Luiz Pereira; Eduardo Mário Dias	O MES atua como ponte entre os níveis de controlo (PLC/SCADA) e gestão (ERP SAP), recebendo ordens de expedição e receção via ERP e executando-as automaticamente através dos PLC e do sistema supervisorio. Permite o acompanhamento em tempo real do processo de carregamento e descarga, assegurando rastreabilidade via RFID e sincronização de dados entre níveis corporativo e operacional.	- Integração vertical completa entre ERP, MES e PLC. - Automação do controlo de ordens sem intervenção manual. - Rastreabilidade total de cargas e veículos via RFID. - Melhoría da eficiência operacional e da manutenção.	- Dependência de infraestrutura de rede e segurança corporativa. - Dificuldade de integração entre sistemas de IT e AT com ciclos de vida diferentes. - Falta de profissionais com competências em ambas as áreas. - Aplicação dos modelos ISA-95 e MESA para organização funcional do MES.	- Integração ERP–MES–PLC com sincronização bidirecional de dados. - Automação sequencial do processo de carregamento e descarga. - Utilização de RFID para rastreabilidade e controlo logístico. - Aplicação dos modelos ISA-95 e MESA para organização funcional do MES.
<i>Developing Integrated Performance Measurement System – Using MDA Approach</i>	O estudo tem como objectivo desenvolver um Sistema Integrado de Medição de Desempenho (PMS) suportado por um MES, utilizando a abordagem Model-Driven Architecture (MDA) e programação orientada a componentes. Pretende-se integrar a recolha de dados de desempenho, o cálculo de indicadores (OEE) e a análise de performances, aplicando UML e CORBA/OPC para interoperabilidade entre os níveis de controlo (PLC/SCADA) e de gestão (MRPIERP). O modelo é validado numa célula flexível de maquinaria ENSAM com CNC e robô de 5 eixos.	Fábrica discreta – célula flexível de maquinaria CNC e robótica industrial	2010 Caso Real	Souhail Sekkat; Jean-Luc Paris; Khalid Kouiss; Janah Saadi; Laurent Deshayes	O MES atua como núcleo integrador entre o controlo da célula (SCADA COSIMIR, PLC, CNC e robô) e o sistema de planeamento (MRP), recolhendo dados de operação e qualidade, calculando indicadores de desempenho e transmitindo relatórios ao nível de gestão. Utiliza arquitetura orientada a serviços (SOA) e middleware baseado em mensagens (EAI), garantindo interoperabilidade entre aplicações heterogéneas e comunicação em tempo real entre o chão-de-fábrica e o nível empresarial.	- Integração vertical entre SCADA, MES e MRP. - Automação do cálculo e visualização de indicadores de desempenho (OEE). - Interoperabilidade entre sistemas através de CORBA e OPC UA. - Flexibilidade na adaptação a diferentes controladores e plataformas.	- Complexidade técnica na modelação e mapeamento MDA. - Dependência de middleware e ferramentas de modelação UML. - Dificuldade de sincronização de dados em ambientes distribuídos. - Elevado esforço de parametrização inicial.	- Arquitetura MDA (modelos PIM/PSM) aplicada ao MES. - Comunicação interoperável via OPC UA e CORBA. - Integração orientada a serviços (SOA) com middleware EAI. - Cálculo automático de KPIs (OEE) em tempo real.
<i>Schedule Execution in Autonomic Manufacturing Execution Systems</i>	O estudo propõe um MES autónimo que executa um plano de produção predefinido de forma autónoma, adaptando-se a perturbações e imperfeições do planeamento. Pretende conciliar a robustez dos sistemas descentralizados com a capacidade de otimização dos sistemas de escalonamento centralizados. O modelo integra o paradigma holónico PROSA e agentes inspirados em colónias de formigas (ant. agents), capazes de prever estados futuros e ajustar intenções de execução conforme a viabilidade do plano fornecido.	Produção discreta – estudo baseado numa fábrica de componentes de teares (máquinas de tecelagem).	2007 Caso Real	Paul Valckenaers; Hendrik Van Brussel; Paul Verstraete; Bart Saint Germain; Hadel	O MES atua como sistema distribuído de execução e coordenação, recebendo um plano/schedule externo e executando-o de forma autónoma. Cada agente de ordem gere o seu próprio percurso, comunica com agentes de recurso e produto e ajusta-se a imprevistos locais. O sistema prevê estados futuros e substitui decisões centralizadas por interações entre agentes que cooperam para seguir o plano, completando-o quando fallam detalhes (transportes, armazenamento, operações auxiliares).	- Execução autónoma e resiliente a perturbações. - Capacidade de prever estados futuros e ajustar decisões localmente. - Integração cooperativa entre escalonador e execução. - Redução de dependência de modelos centralizados e aumento de robustez.	- Dificuldade em garantir seguimento rigoroso de planos inviáveis. - Complexidade no controlo de escalabilidade e estabilidade. - Requer calibração de parâmetros (slack time, número de agentes). - Elevado esforço de experimentação e validação de critérios de conformidade ao plano.	- Cooperação entre escalonador e MES autónimo. - Agentes holónicos (Product–Resource–Order–Staff) segundo a arquitetura PROSA. - Ant. agents (exploration / intention) para propagação de intenções e reservas. - Execução e ajustamento de schedules através de decisões locais autónomas.

O trabalho propõe um modelo de Manufacturing Execution System holónico e orientado a produto (H-MES) capaz de suportar produção personalizada em massa. Baseia-se no conceito de smart-product, em que cada produto dirige a sua própria produção, solicitando serviços a recursos inteligentes encapsulados em "holons". Desenvolve-se um meta-modelo de controlo baseado em regras (rule-based system) que organiza a cooperação entre holons de produto e de recurso, visando flexibilidade, auto-organização e consistência entre fluxos físicos e informacionais.	O MES é concebido como um sistema holónico composto por entidades de produto (smart-product holons) e de recurso (resource-holons) que negociam serviços e operam com autonomia. As regras de controlo definem momentos de cooperação entre holons e asseguram consistência entre os fluxos informacionais e físicos. O sistema é implementado e testado no ambiente de simulação ANALYTICE II, permitindo avaliar a viabilidade da execução orientada a produto em contexto de customização em massa.	- Auto-organização e flexibilidade na execução de ordens. - Consistência entre fluxos físicos e digitais (smart-product). - Escalabilidade para ambientes customizados e dinâmicos. - Facilidade de reutilização de modelos no meta-modelo ANALYTICE II. - Smart-products que reservam recursos e auto-organizam a produção.	- Complexidade na modelação de regras e gestão de holons. - Risco de conflitos ou deadlocks em sistemas altamente dinâmicos. - Necessidade de capacitação em engenharia de sistemas baseados em agentes. - Limitação da validação a cenários simulados.
O objetivo é propor um mecanismo de colaboração entre sistemas de planeamento (MRP, MRP II, ERP, SCM) e um MES orientado a agentes capaz de adaptar-se dinamicamente a alterações e perturbações. Pretende-se combinar a otimização de longo prazo dos sistemas de planeamento com a robustez e capacidade adaptativa da execução distribuída. O modelo implementa princípios holónicos (PROSA) e mecanismos de coordenação inspirados em colónias de formigas ("exploring" e "intention ants") que suportam decisões descentralizadas e reconfiguração sem necessidade de re-planeamento central.	O MES multi-agente atua como sistema de execução distribuído, composto por agentes de ordem, recurso e produto, que representam entidades físicas e informacionais do chão-de-fábrica. Estes agentes trocam informação continuamente, reservam recursos e ajustam intenções de execução segundo as condições reais. O MES coopera com sistemas de planeamento de diversos níveis (MRP → SCM), incorporando os cenários planeados e ajustando-os localmente em função de perturbações, sem necessidade de interrupção global.	- Adaptação automática a perturbações e falhas. - Redução da necessidade de re-planeamento central. - Integração dinâmica entre planeamento e execução. - Reutilização de agentes genéricos com comportamento social e cooperativo. - Complexidade de modelação de agentes e parâmetros. - Dificuldade de validação em ambientes industriais reais. - Necessidade de balancear estabilidade e autonomia local. - Elevado esforço de calibração e sincronização com planeadores ERP/SCM.	- Arquitetura multi-agente baseada em PROSA. - Cooperação planeador ↔ MES via agentes agregados (aggregated agents). - Propagação de intenções e reservas com "ant agents". - Resolução descentralizada de conflitos e perturbações.
O objetivo é conceber um modelo genérico e adaptável de dados para MES que suporte a integração entre planeamento empresarial (ERP) e controlo de equipamentos (DCS/PLC). O modelo baseia-se na técnica EER (Extended Entity-Relationship), estruturando quatro componentes de base de dados – recursos, planos executáveis, estado do sistema e configuração – para assegurar modularidade, reconfiguração e rastreabilidade. Pretende-se facilitar o desenvolvimento de software MES flexível e interoperável para ambientes de produção discreta.	Indústria de produção discreta (SRSS), Detail Executable Plan (DEPSS), System Configuration (SCSS), que representam respetivamente recursos, planos, estados e configuração. Estas estruturas suportam rastreabilidade de ordens, gestão de manutenção e reconfiguração dinâmica da produção.	- Estrutura modular e extensível. - Integração transparente entre ERP, MES e controlo. - Suporte a rastreabilidade e manutenção preventiva. - Facilita a reconfiguração de linhas e a adaptação a diferentes escalas industriais. - Foco restrito na produção discreta. - Exige elevado esforço de modelação e normalização de entidades. - Necessidade de validação adicional em empresas de diferentes dimensões.	- Modelação conceptual baseada em EER com quatro estruturas principais (SRSS, DEPSS, SCSS, SCSS). - Representação hierárquica e relacional de entidades e subentidades. - Integração de dados de planeamento, estado e configuração. - Protótipagem prática em Microsoft Access e Visual C++ para verificação funcional.

<i>A data-driven approach toward a machine- and system-level performance monitoring digital twin for production lines</i>	Yaqing Xu; Yassine Qamisan; Saumuy Puchala; Annette Januszcak; Dawn M. Tilbury; Kira Barton	2024 Caso Real	Propor uma abordagem data-driven para monitorização de desempenho a nível de máquina e de sistema, suportando um gémeo digital de linhas de produção. A metodologia classifica estados de máquina registados no MES em subestados finos para analisar variabilidade de tempos de ciclo, modela o nível de máquina com autómatos probabilísticos e o nível de sistema com regressão logística para prever transições de fluxo produtivo. Pretende-se detetar desvios precoces e relações causa-efeito entre máquinas, permitindo atuação proativa para otimizar a eficiência global.	O MES é a fonte de dados operacionais, registando estados de máquina a cada 1 s (início/fim e duração) e identificadores de máquina/peça. Os estados são refinados em subestados com base em duração e frequência para caracterizar variabilidade de ciclo. Estes dados alimentam modelos ao nível de máquina (autómatos probabilísticos) e ao nível de sistema (regressão logística do indicador binário de Flow) para previsão de desvios e análise de interdependências entre equipamentos.	- Classificação algorítmica de subestados (teste Jarque-Bera, bootstrapping S-K, goodness-of-fit). - Modelos de Autómato Probabilístico por máquina (transições e permanências). - Regressão logística para prever Flow (bom vs turbulento) com AUROC/F1. - Visualização de pesos θ para revelar relações a montante/jusante.
<i>The Industry 4.0 Revolution and the Future of Manufacturing Execution Systems (MES)</i>	Francisco Almada-Lobo	2015 Revisão sistemática	Analisar a transformação do papel dos sistemas MES perante o paradigma da Indústria 4.0, caracterizado pela descentralização lógica, conectividade inteligente e integração vertical e horizontal. O artigo procura definir a transição de sistemas centralizados para arquiteturas distribuídas, orientadas por serviços e suportadas por tecnologias digitais emergentes. Explora ainda a necessidade de repensar o controlo e a orquestração das operações fabris num ambiente composto por entidades autónomas e ciberfísicas.	O MES é descrito como o núcleo de coordenação entre o chão de fábrica e os sistemas empresariais, devendo evoluir para uma rede descentralizada de entidades inteligentes (CPS/CPPS). Passa a funcionar como agente lógico de integração e de mediação entre produtos, equipamentos e serviços, suportando a personalização em massa e a orquestração automática das operações produtivas.	- Elevada complexidade de integração em arquiteturas distribuídas. - Suporte à transformação digital e à integração total dos processos. - Capacidade de orquestrar serviços e dados num ambiente descentralizado. - Melhoría da agilidade e da eficiência operacional. - Desafios na migração de sistemas centralizados para tempo real.
<i>Multi-level Production Control: Modern State, Problems, Prospects</i>	L. M. Yakovis	2010 Revisão sistemática	O artigo analisa o estado atual, os problemas e as perspetivas do controlo automático multinível na produção industrial, descrevendo a integração entre sistemas de automação de processos (ACSP) e corporativos (APCS/ERP). Pretende-se compreender como a informatização, a modelação e o aumento do "nível inteligente" podem melhorar a eficiência global e a coordenação entre os diferentes níveis hierárquicos de controlo e gestão da produção.	O MES é caracterizado como o elo de ligação entre os níveis inferiores (controlo de processo e automação) e os níveis superiores (planeamento e gestão ERP/APCS). Recolhe, processa e agrega dados de produção, qualidade e consumo energético, gerando relatórios e indicadores para apoio à decisão. Inclui funcionalidades de controlo operacional, rastreamento de fluxos de materiais e manutenção de equipamentos, atuando como sistema de informação analítico e de controlo em tempo real.	- Integração hierárquica entre ACSIP–MES–ERP. - Agregação e análise de dados de processo e qualidade. - Utilização de simulação e modelos de otimização para apoio à decisão. - Automação inteligente com níveis de controlo adaptativos e robustos.

<i>Evolution of Manufacturing Planning and Control Systems: From Reorder Point to Enterprise Resource Planning</i>	Patrick J. Rondeau; Lewis A. Litteral	2001	Revisão sistemática	O artigo analisa a evolução histórica dos sistemas de planeamento e controlo da produção, descrevendo cinco estágios: Reorder Point Planning (MRP), Material Requirements Planning (MRP), Manufacturing Resource Planning (MRP II), MRP II com MES e ERP com MES. O objectivo é compreender as transformações tecnológicas e organizacionais que levaram à integração total entre planeamento, execução e gestão empresarial, evidenciando o papel da tecnologia da informação como motor de mudança dos sistemas MPC ao longo de quatro décadas.	Perspetiva transversal à indústria - exemplos de ambientes discretos e processo em contexto norte-americano.	O MES é apresentado como a evolução natural dos sistemas MRP II, atuando como interface crítica entre o planeamento de recursos e o controlo de chão-de-fábrica. Unifica os processos de fabrico num sistema integrado de execução e controlo em tempo real, permitindo retroalimentação contínua dos dados de produção para apoio à decisão e melhoria da qualidade, manutenção e cumprimento de prazos. O MES converte o modelo de controlo fechado do MRP II num "loop" contínuo de execução e planeamento.	- Integração vertical e planeamento e execução. - Retroalimentação em tempo real de dados de produção. - Redução de ciclos, WIP e erros de registo. - Base para a integração ERP e para a gestão orientada ao cliente. - Custos elevados de aquisição e implementação. ERP. - Complexidade organizacional na integração com MRP/ERP. - Dependência de infraestruturas de dados (Barcode, RFID, LAN). - Ausência de padrões funcionais universais (à data do estudo). - Integração MRP II ↔ MES ↔ ERP. - Execução em tempo real e controlo baseado em dados. - Automação de processos e recolha de dados (Barcode, RFID, LAN). - Transformação de sistemas MPC em plataformas colaborativas de cadeia de valor.
---	--	-------------	----------------------------	--	---	---	---

Título	Autores	Ano	Tipo de estudo	Integra Tecnologias 14.0	Nome das Tecnologias 14.0	Resultados e Benefícios do MES	Barreiras e desafios do MES	Observações
<i>Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems</i>	Richard Rozs; Matyas Ando	2020	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - via RFID e sistemas NCS para recolha e troca automática de dados. Inteligência Artificial (IA) - através de visão computacional e processos de aprendizagem/aprendizagem automática. Big Data e Análise de Dados - gestão e análise de grandes volumes de dados para suporte à decisão (DIKW). Robôs Autônomos - integração de robôs industriais/colaborativos e AGV na execução. Simulação/Gêmeos Digitais - uso de simulação (Gantt, SS/CP) para validação e otimização; gémeos digitais não explicitados. Cibersegurança - foco em segurança de dados e mitigação de ameaças (DoS, MITM, spoofing, injeção de dados).	- Lean + MES: redução de 50 % de refugos e 40 % de tempo/custos. - SS/CP + MES: execução mais estável e eficiente. - NCS: monitorização contínua e melhor controlo do ciclo produtivo. - Robô + visão + CAX: maior fiabilidade e orientação ao operador. - AGV + RFID: redução do tempo total (289 → 275 s, simulação).	- Interoperabilidade entre sistemas. - Dependência de dados estruturados. - Uso restrito em design e custos dinâmicos. - Curva de aprendizagem em MBSE/SysML. - Complexidade de modelos de larga escala. - Vulnerabilidade a ciberameaças.	O trabalho mostra que o MES, enquanto ponte entre ERP e chão de fábrica, aumenta transparência, rastreabilidade e eficiência quando suportado por dados em tempo real e integração vertical/horizontal. A integração com SCADA, SS/CP, HMES/PROSA e CPWS potencia execução orquestrada e decisão informada. Persistem desafios de interoperabilidade, cibersegurança e utilização limitada em conceção/qualidade/custos dinâmicos. Futuro: normalização de interfaces, dados de melhor qualidade e adoção de arquiteturas baseadas em agentes.
						- Integração eficaz entre SAP MES e AIV. - Redução da intervenção humana. - Aumento da produtividade e flexibilidade. - Sistema configurável e reutilizável. - Comunicação bidirecional em tempo real. - Prova de conceito validada em ambiente fabril.	- Limitação a um único AIV. - Necessidade de parametrização manual. - Dependência de rede estável. - Custos de desenvolvimento inicial. - Carência de padronização entre plataformas. - Ausência de comparação temporal com sistemas comerciais.	
						- Plataforma MES genérica, configurável e flexível. - Implementação em ambiente fabril real (linha FASTory). - Execução distribuída e interoperável via serviços RESTful. - Integração completa com dispositivos IoT. - Redução de tempo e custo de configuração. - Suporte a reconfiguração dinâmica e modularidade elevada.	- Sobre carga de comunicação e processamento. - Riscos de segurança. - Resistência cultural à adoção de soluções baseadas na web. - Necessidade de reformular práticas industriais. - Maturidade limitada para comercialização. - Dependência da qualidade das ontologias e da normalização semântica.	
<i>Integration of an MES and AIV Using a LabVIEW Middleware Scheduler Suitable for Use in Industry 4.0 Applications</i>	Muzaffar Rao; Liam Lynch; James Coady; Daniel Toal; Thomas Newe	2020	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha e troca de dados entre MES, AIV e sensores. Computação em Nuvem - acesso remoto e comunicação via serviços web. Cibersegurança - proteção de dados entre MES e middleware. Robôs Autônomos - utilização de AIVs (Robotnik RB-1J e Turtlebot-3). Simulação/Gêmeos Digitais - mapeamento de trajetórias e validação em ROS/Rviz.	- Integração eficaz entre SAP MES e AIV. - Redução da intervenção humana. - Aumento da produtividade e flexibilidade. - Sistema configurável e reutilizável. - Comunicação bidirecional em tempo real. - Prova de conceito validada em ambiente fabril.	- Limitação a um único AIV. - Necessidade de parametrização manual. - Dependência de rede estável. - Custos de desenvolvimento inicial. - Carência de padronização entre plataformas. - Ausência de comparação temporal com sistemas comerciais.	A integração MES—AIV via middleware LabVIEW mostra transporte automático eficaz, redução de intervenção humana e monitorização em tempo real com SAP MES. A comunicação bidirecional de baixa latência melhora produtividade e flexibilidade. Limitações: um único AIV, dependência de rede e parametrização. Futuro: múltiplos veículos, tolerância a falhas e normalização de interfaces.
						- Plataforma MES genérica, configurável e flexível. - Implementação em ambiente fabril real (linha FASTory). - Execução distribuída e interoperável via serviços RESTful. - Integração completa com dispositivos IoT. - Redução de tempo e custo de configuração. - Suporte a reconfiguração dinâmica e modularidade elevada.	- Sobre carga de comunicação e processamento. - Riscos de segurança. - Resistência cultural à adoção de soluções baseadas na web. - Necessidade de reformular práticas industriais. - Maturidade limitada para comercialização. - Dependência da qualidade das ontologias e da normalização semântica.	
						- Plataforma MES genérica, configurável e flexível. - Implementação em ambiente fabril real (linha FASTory). - Execução distribuída e interoperável via serviços RESTful. - Integração completa com dispositivos IoT. - Redução de tempo e custo de configuração. - Suporte a reconfiguração dinâmica e modularidade elevada.	- Sobre carga de comunicação e processamento. - Riscos de segurança. - Resistência cultural à adoção de soluções baseadas na web. - Necessidade de reformular práticas industriais. - Maturidade limitada para comercialização. - Dependência da qualidade das ontologias e da normalização semântica.	
<i>Generic platform for manufacturing execution system functions in knowledge-driven manufacturing systems</i>	Wael M. Mohammed; Borja Ramis Ferrer; Sergii Iarovy; Elisa Negri; Luca Fumagalli; Andrei Lobov; Jose L. Martinez Lastra	2018	Arquitetura	Sim				O trabalho mostra que serviços MES semânticos (ontologias + REST) permitem reconfigurabilidade elevada, independência de fornecedor e descoberta dinâmica, comprovado na linha FASTory. A interoperabilidade melhora integração IoT e orquestração. Persistem sobre carga comunicacional, maturidade limitada de semântica e questões de segurança web. Futuro: normalização semântica e automatização da configuração.

Augmented reality integration into MES for connected workers	Andreea Blagi; Cristian Militaru; Ady-Daniel Mezei; Levente Tamas	2021	Arquitetura	Sim	Realidade Aumentada (RA) – via HoloLens, ARCore, Google Tango, Epson Moverio Gêmeos Digitais – modelos CAD 3D para montagem Internet das Coisas (IoT) – comunicação ROS e Siemens IoT2040 Computação em Nuvem – IBM Bluemix Robôs Colaborativos – Baxter e AGV Turtlebot Cibersegurança – protocolo Rosbridge para comunicação segura	- Melhoria da segurança dos trabalhadores. - Redução do tempo de montagem e de calibração. - Aumento da precisão e qualidade na montagem colaborativa. - Visualização 3D em tempo real de processos e componentes. - Formação mais intuitiva e menor curva de aprendizagem. - Integração ROS–MES em milissegundos. - Melhoria da produtividade e redução de custos.	- Calibração complexa entre dispositivos RA e robôs. - Limitações de hardware (HoloLens, ARCore). - Precisão afetada por iluminação ou reflexos. - Falta de padrões industriais para interfaces RA–MES.	O estudo mostra que integrar RA com MES melhora percepção 3D, segurança e desempenho em montagem e colaboração homem–robô. A arquitetura liga dispositivos RA, ROS e MES/ERP, fornecendo instruções e feedback em tempo real. Desafios: calibração, robustez a condições ambientais e falta de padrões. Futuro: hardware mais maduro e interfaces RA–MES padronizadas.
	Design and Implementation of Cloud-Based Collaborative Manufacturing Execution System in the Korean Fashion Industry	Minjae Ko; Changho Lee; Yongju Cho	2022	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha em tempo real de dados de máquinas (costura), ambiente (temperatura/humidade) e leitura de códigos via visão; integração por gateway IoT. Computação em Nuvem - plataforma MES colaborativa baseada na web para todas as empresas da cadeia. Big Data e Análise de Dados - monitorização de KPIs e uso de dados operacionais para melhoria de processos (com evolução prevista para análises mais avançadas).	- Sistema aplicado e em uso ativo, expandido para 11 empresas da cadeia. - Automação ≥50% em 7 de 13 processos após introdução do MES. - Redução do <i>lead time</i> por gestão da qualidade em tempo real via móvel. - Rastreabilidade completa de ordens/delitos/WIP. - Painéis com estado de processos e entregas "a qualquer hora e em qualquer lugar".	- Integração heterogénea (ERP, dispositivos, múltiplas PMEs). - Necessidade de segurança (wireless/cloud) e normalização. - Dependência de conectividade estável. - Carência de funções analíticas avançadas no curto prazo. - Necessidade de recomendadores (empresas/design) para escalar a colaboração.
Towards the encapsulation and decentralisation of OKD-MES services within embedded devices	Borja Ramis Ferrer; Jose Luis Martinez Lastra	2017	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - dispositivos incorporados inteligentes (RTUs, Raspberry Pi, Arduino, Onion Omega) conectados por web services. Sistemas Ciber-físicos (CPS) - sinergia entre domínios físico e cibernético no controlo descentralizado. Computação em Nuvem / Edge - distribuição e partilha de conhecimento entre dispositivos. Big Data e Análise de Dados - gestão e raciocínio sobre bases de conhecimento distribuídas. Cibersegurança - prevenção de falhas de nó central e redundância distribuída.	- Aumento da robustez e resiliência a falhas. - Flexibilidade plug-and-play de dispositivos e conhecimento. - Escalabilidade total do sistema OKD-MES. - Redução de comunicação vertical e de tempos de resposta. - Integração local entre equipamento e modelo de conhecimento. - Autonomia dos dispositivos incorporados com raciocínio semântico.	- Limites de capacidade dos dispositivos. - Conflitos de dados entre nós. - Custo acrescido de hardware. - Necessidade de algoritmos para resolução de inconsistências. - Desempenho reduzido em sistemas de pequena escala. - Definição de limites de encapsulamento e métodos de cooperação entre dispositivos.	A descentralização de serviços OKD-MES em dispositivos incorporados mostra maior autonomia, resiliência e escalabilidade, reduzindo dependência de servidores centrais. O raciocínio semântico distribuído potencia cooperação entre nós. Desafios: conflitos de conhecimento, capacidade de hardware e governação. Futuro: mecanismos de consenso, reconciliação e padrões de cooperação.

MES-integrated digital twin frameworks	Elisa Negri; Stefano Berardi; Luca Fumagalli; Marco Macchi	2020	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - aquisição/sobre-escrita de estados de sensores e máquinas via OPC UA, MQTT/ROS/DDS/TCP conforme equipamento. Robôs Autônomos - estação de montagem por robô integrada nos fluxos DT-MES (detecção de erros e limpeza/retoma). Simulação e Gêmeos Digitais - DT em MATLAB/Simulink com camada de inteligência para decisões e atuação via MES (fecho do ciclo). - Redução média do tempo de inatividade em 11 estados de erro. - >80-90 % Nos erros tipo B. - ~25-60 % Nos tipo A. - Interrupções automáticas de ordens e reagendamentos para peças não conformes (desmontagem realtiva). - Melhoria da interação homem-máquina (HCPS) e visibilidade de erros ao operador. - Execução reativa baseada em eventos com comunicação bidirecional DT-MES em tempo real. A integração <i>Digital Twin</i>-MES mostra fecho do ciclo de controle e reduções significativas de tempos de inatividade, com atuação reativa a não conformidades. A viabilidade é comprovada em linhas laboratorial com OPC UA/TCP/IP. Desafios: regras da camada de inteligência, variabilidade humana e integração por estação. Futuro: robustez de comunicação e generalização industrial.
					- Definir e manter regras na camada de inteligência. - Variabilidade humana limita ganhos nos erros tipo A. - Necessidade de engenharia de integração por estação e protocolo. - Robustez de comunicação e parsing. - Generalização para além do laboratório.
A Multi-MLP Prediction for Inventory Management in Manufacturing Execution System	LoveAllen Chijioke Ahakonye; Ahmad Zainudin; Md Javed Ahmed Shanto; Jae-Min Lee; Dong-Seong Kim; Taesoo Jun	2023	Arquitetura	Sim	Inteligência Artificial (IA) - aprendizagem profunda com Multi-MLP e LightGBM para previsão de inventário. Machine Learning - comparação de algoritmos (MLP, LSTM, GRU, Bi-LSTM). Big Data e Análise de Dados - utilização de grandes conjuntos de dados públicos (Kaggle Backorders). Computação em Nuvem - recomendada como estratégia futura para implementação e partilha de dados. - Valores de erro muito baixos, MAE = 0,2331. - MSE = 0,1225. - RMSE = 0,3504 (elevada fiabilidade na previsão de necessidades de inventário). - Coeficiente de determinação $R^2 = 0,5099$ (indica alta precisão). - Tempo de computação reduzido (24,5 s). - Eficiência de previsão > 50 %. O modelo Multi-MLP com LightGBM mostra melhorias em MAE/MSE/RMSE e tempo computacional, sugerindo utilidade para previsão de inventário em MES. A integração com decisão em tempo real pode reduzir custos de stock. Limitações: dados públicos e ausência de validação industrial. Futuro: pilotos reais, integração cloud e governação de dados.
					- Qualidade e disponibilidade de dados brutos. - Ausência de validação industrial. - Necessidade de competências em IA e ML. - Resistência à integração com sistemas existentes. - Custos de implementação inicial. - Necessidade de normalização e equilíbrio de dados para evitar enviesamentos.
Engineering change order processing in ERP systems	Benoît Saenz de Ugarte; Adriene Hajji; Robert Pellerin; Abdelhakim Artiba	2010	Arquitetura	Sim	Simulação e Gêmeos Digitais - simulação de eventos discretos em tempo real (VISUAL SLAM) para apoio à decisão e otimização. Inteligência Artificial (IA) - uso de algoritmo genético para otimização dinâmica da sequência de produção. Internet das Coisas (IoT) - interligação via clientes OPC entre máquinas, ERP e MES para aquisição de dados em tempo real. - Redução de até 13,6 % no tempo total de produção. - Aumento de flexibilidade operacional e reprogramação automática. - Comunicação bidirecional ERP-MES em tempo real. - Integração eficaz do algoritmo genético no núcleo de decisão. - Capacidade de resposta rápida a eventos de alteração de engenharia. - Otimização de recursos e redução de paragens. A arquitetura ERP-MES com simulação de eventos discretos e algoritmo genético mostra resposta rápida a ordens de alteração de engenharia e redução do tempo total de produção. A reprogramação automática integra-se ao fluxo ECO. Desafios: parametrização, integração complexa e escalabilidade. Futuro: múltiplos casos, normas de integração e métricas operacionais.
					- Necessidade de ajuste dos parâmetros do algoritmo (Pc, Pm, MaxGen). - Integração complexa entre ERP e MES. - Tempo de execução dependente da complexidade dos calendários. - Dificuldade de escalabilidade para ambientes industriais reais. - Ausência de normas de integração uniformes.

<i>Design choices for next-generation IoT-connected MES/MOM: An empirical study on smart factories</i>	Soujanya Mantravadi; Charles Möller; Chen Li; Reto Schnyder	2022	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT/IIoT) - conectividade entre PLCs, MES e ERP via OPC UA e MQTT. Computação em Nuvem - hospedagem e sincronização de Odoo (ERP/MES) em ambiente cloud. Simulação e Gêmeos Digitais - uso de modelos de processo e fluxos ISA-95 integrados para representar operações em tempo real. Cibersegurança - implementação de protocolos criptográficos e autenticação segura para IIoT. Big Data e Análise de Dados - estrutura de interoperabilidade e recolha contínua de dados de sensores.	- Interoperabilidade identificada como a característica de design mais crítica (31 % de importância). - Arquitetura modular e distribuída validada em três mostradores industriais. - Integração estável ERP–MES–IIoT no Smart Lab (Universidade de Aalborg). - Redução da complexidade de implementação e aumento da flexibilidade de fabrico. - Maior segurança na comunicação IIoT através de encriptação e autenticação. - Melhoría da rastreabilidade e personalização de encomendas em massa.	- Ausência de normalização universal ISA-95/IIoT. - Interoperabilidade semântica limitada. - Custos de integração. - Complexidade da modularização. - Necessidade de competências em código aberto e protocolos industriais. - Lacunas de cibersegurança em ambientes brownfield. A investigação empírica mostra viabilidade de MES/MOM IIoT-conectado com ISA-95, OPC UA e MQTT, destacando interoperabilidade como requisito crítico. A arquitetura modular e distribuída melhora flexibilidade e rastreabilidade. Desafios: normalização incompleta e segurança em <i>brownfields</i>. Futuro: diretrizes de integração IIoT/OT escalável e segura.	
<i>Material-flow modeling technology and its application in manufacturing execution systems of petrochemical industry</i>	Defang Li; Lu Liu; Wei Zhu; Gang Rong	2008	Arquitetura	Não explicitamente	Foco em modelação logística dinâmica num MES de processos; o trabalho antecede a terminologia II.0	- Modelo dinâmico reflete com precisão a estrutura logística no período de produção. - Redução da dimensão/complexidade do modelo vs. enumeração estática (ver contraste de dimensões). - Adaptação imediata a alterações de processo (p. ex., transformação da unidade de hidrogenação II). - Menos erros e melhor reconciliação dos dados logísticos. - Facilita a integração de módulos de aplicação no MES (SinoMES V2.0).	- Requisitos de dados em tempo real fiáveis (medição/armazenamento/movimento). - Manutenção de regras de incidente. - Heterogeneidade de unidades e materiais (líquidos/gases/sólidos). - Necessidade de atualização contínua do modelo com base em eventos. - Escalabilidade para múltiplas plantas. A modelação dinâmica de fluxo de materiais no SinoMES V2.0 mostra melhor aderência ao processo, menor complexidade face à enumeração estática e reconciliação facilitada. A atualização por eventos reflete a logística real por período. Desafios: fiabilidade de medições, regras de incidente e heterogeneidade de unidades. Futuro: escalabilidade multi-planta e qualidade de dados.	
<i>The practices of integrating manufacturing execution system and Six Sigma methodology</i>	Yeong-Dong Hwang	2006	Arquitetura	Sim	Big Data e Análise de Dados - análise estatística em tempo real via SPC, MSA e DOE. Internet das Coisas (IoT) - ligação de equipamentos e sensores de fabrico ao MES para recolha automática de dados. Computação em Nuvem - armazenamento centralizado de bases de dados e integração com ERP/SCM/SSM. Cibersegurança - controlo de acesso e documentação eletrónica segura para dados de processo.	- Melhoría do desempenho e da capacidade do processo com eliminação de variabilidade. - Redução do tempo de ciclo e maior lucro por resposta rápida ao mercado. - Aumento do rendimento acumulado (RTY) e melhoría da qualidade em linha. - Redução dos custos operacionais através de SPC e gráficos de visualização. - Integração com ERP para melhor planeamento e controlo de recursos. - Melhoría contínua (kaizen) com formação e normalização dos processos.	- Dependência de dados precisos e em tempo real. - Limitação do estudo a modelo conceptual. - Ausência de resultados industriais quantificados. - Requer integração complexa entre módulos MES e ERP. - Custos iniciais elevados. - Resistência organizacional à mudança. A integração MES–DMAIC mostra estrutura de melhoría contínua com dados fiáveis, reduzindo tempo de ciclo e custos e aumentando capacidade e RTY. A ligação a ERP/SCM reforça planeamento e controlo. Limitações: estudo conceptual e falta de métricas amplas. Futuro: validação setorial, reforço de cibersegurança e competências estatísticas.	

RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production	Ray Y. Zhong; Sheng Yang; Tan Yingfeng Zhang; Da Xu Wang	2013	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – ligação de equipamentos, leitores RFID e PLCs através de rede Ethernet para recolha e transmissão de dados em tempo real. Computação em Nuvem – integração via web services XML e armazenamento centralizado acessível remotamente. Big Data e Análise de Dados - tratamento contínuo de grandes fluxos de dados RFID e produção de indicadores OEE em tempo real. Cibersegurança - gestão de permissões de acesso e proteção de dados RFID em comunicação web.	- Redução de erros humanos > 95 % na recolha de dados. - Atualização automática de ordens e estado de produção em tempo real. - Melhoria da eficiência operacional ≈ 15–20 %. - Aumento da precisão de dados e da rastreabilidade global. - Integração plena com ERP e planeamento da produção. - Resposta rápida a pedidos personalizados em massa.	O estudo mostra que um MES suportado por RFID viabiliza rastreabilidade em tempo real, elimina grande parte da entrada manual de dados e melhora a eficiência operacional na produção personalizada em massa. A integração com ERP via serviços web permite sincronização contínua entre planeamento e execução, aumentando a precisão informacional e a capacidade de resposta. Persistem desafios ligados a custos, fiabilidade de rede, limitações de leitura RFID e padronização. Como trabalho futuro, sugerem-se escalabilidade industrial, reforço de cibersegurança e incorporação de analítica/IA para decisão proativa.
Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system	Pedro Daniel Urbina Coronado; Roby Lynn; Wafa Louhichi; Mahmoud Parto; Ethan Wescoat; Thomas Kurfuss	2018	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – sensores e máquinas CNC ligados via MTConnect e REST. Computação em Nuvem - armazenamento MySQL e visualização web em tempo real. Dispositivos Móveis e Aplicações Web - entrada de dados e monitorização remota. Simulação e Gémeos Digitais – criação do <i>Shop Floor Digital Twin</i> a partir dos dados MES e CNC.	- Eliminação de formulários em papel e erros de entrada. - Correlação entre dados MTConnect e informações do operador. - Visualização em tempo real de inventário, ferramentas e produção. - Documentação fotográfica do processo de fabrico. - Expansibilidade para PME e adoção gradual da Indústria 4.0.	O estudo mostra que um MES móvel e em nuvem permite às PME adotar o paradigma da Indústria 4.0 com baixo custo e alta acessibilidade. A integração com MTConnect fornece dados de máquina em tempo real, enquanto a aplicação Android recolhe informação de operadores e materiais, criando um gémeo digital do chão de fábrica. O sistema melhora a rastreabilidade e a visibilidade global da produção, mas enfrenta desafios de escala e automatização completa da entrada de dados. Futuro: integração com IA e analítica preditiva para controlo e otimização autónomos.
SAP R/3 in process industries: expectations, experiences and outlooks	Andreas Schumann	1997	Arquitetura	Não	(o trabalho antecede a 14.0; foco em ERP-MES e automação por lotes clássica).	- Coordenação e documentação fiáveis de fluxos de materiais e atividades de produção. - Inventário e armazéns com rastreabilidade por lote "a qualquer momento". - Relatórios automáticos de desempenho, utilização de equipamento e valores de stock. - Integração do QM para inspeções e estados de libertação de lotes. - Cenário promissor de instruções PP-PI para execução manual com registo eletrónico.	- Falta de mapeamento PP-PI completo ao modelo ISA-88 (módulo de equipamento). - Planeamento pouco ágil (Gantt manual). - Custos/segurança para terminais em área classificada. - Manutenção de receitas em sistemas duplos. - Necessidade de interfaces padrão para schedulers. - Dilemas entre exigências contabilísticas e manuseamento físico. O estudo mostra que o SAP R/3 pode cumprir o papel de MES integrado em indústrias de processo, entregando rastreabilidade, inventário e documentação de lotes com forte ligação ao negócio. As experiências reais revelam, contudo, lacunas face ao controlo por lotes ISA-88 e limitações no planeamento e ergonomia de receitas, exigindo sistemas técnicos complementares e interfaces padrão. Persiste tensão entre integração monolítica e melhores-de-classe. Futuro: normalizar interfaces SAP-schedulers/batch, melhorar a engenharia de receitas e reforçar a interoperabilidade com sistemas técnicos.

<i>Benefit Model of Virtual Metrology and Integrating AVM Into MES</i> Fan-Tien Cheng, Jonathan Yung-Cheng Chang; Hsien-Cheng Huang; Chi-An Kao; Ying-Lin Chen, Ju-Lei Peng 2011 Arquitetura Sim	Big Data e Análise de Dados - modelos RI/GSI/DQI e análise massiva de dados de processo. Inteligência Artificial (IA) - algoritmos de previsão e aprendizagem de metrologia virtual. Internet das Coisas (IoT) - comunicação em rede entre ferramentas de processo, metrologia e MES. Computação em Nuvem - servidores AVM e MC distribuídos para modelação e atualização automática. Simulação e Gêmeos Digitais - representação virtual do estado das ferramentas e dos wafers em produção.	- Redução de $\approx 9,55\%$ no tempo de ciclo. - Poupança de ≈ 21 M USD em investimento anual. - Ganho líquido $\approx 63,5$ M USD ano (benefício total do modelo VM). - Diminuição de refugos ($\Delta Y \approx 0,26\%$). - Eliminação de 40%–45% de operações de metrologia física. - Melhoria de controlo W2W e estabilidade de rendimento. - Integração padronizada entre MES, SPC e R2R.	- Manter precisão de VM $< 10\%$. - Tratar falsos alarmes (≈ 52 k USD/ano) e detecções falhadas (≈ 45 k USD/ano). - Requerer modelo dinâmico de aprendizagem. - Custos operacionais de servidores AVM. - Dependência de dados limpos e sincronizados.	O estudo mostra que a integração da metrologia virtual automática no MES transforma a garantia de qualidade em tempo real numa realidade viável para a indústria de semicondutores. O modelo de benefícios proposto quantifica ganhos significativos de tempo de ciclo e redução de custos, validando a AVM como pilar da fábrica inteligente. A integração com os controladores R2R permite controlo wafer-to-wafer robusto e redução de refugos. Apesar dos custos de manutenção e da necessidade de precisão elevada, o sistema prova-se sustentável e expansível para a nova geração de fábricas semicondutoras.
<i>An IoT-Enabled Real-Time Dynamic Scheduler for Flexible Job Shop Scheduling (FJSS) in an Industry 4.0-Based Manufacturing Execution System (MES 4.0)</i> Anum Tariq; Shoab Ahmed Khan; Wasi Haider But; Asim Javaidi; Tehmina Shehryar 2024 Arquitetura Sim	Internet das Coisas (IoT) - rede de sensores de corrente em máquinas, Smart Sense Nodes (SSN/SSNS) e interfaces de painel para monitorização e reagendamento em tempo real.	- Adaptação em tempo real a avarias com reagendamento parcial e continuidade do processo. - Desempenho robusto e superior face a RS/RC/IHA. - Decisão proativa baseada em dados IoT. - Ciclo monitorização-decisão-execução integrado no MES.	- Cobertura/latência de rede. - Instalação e manutenção de sensores. - Qualidade/fiabilidade dos dados. - Aftinação de parâmetros (GA, limiares SGR). - Generalização para múltiplas perturbações e métricas adicionais.	O trabalho mostra que um reagendador MES 4.0 habilitado por IoT melhora a resiliência operacional em job shops flexíveis, reagindo a avarias com robustez e estabilidade e superando estratégias isoladas. A técnica RCGSR integrada ao MES elimina dependência de relatórios manuais e apoia decisão proativa com dados em tempo real. Persistem desafios de instrumentação e parametrização, assim como a necessidade de avaliar métricas adicionais e cenários com perturbações múltiplas para escalar industrialmente.
<i>An Asset Administration Shell Method for Data Exchange Between Manufacturing Software Applications</i> Xun Ye; Mengmeng Yu; Won Seok Song; Seung Ho Hong 2021 Arquitetura Sim	Internet das Coisas (IoT) - comunicação máquina-a-máquina via OPC UA. Cibersegurança - comunicação normalizada e segura via OPC UA. Simulação e Gêmeos Digitais - representação digital dos sistemas MES e ERP através do AAS.	- Troca de dados MES$\leftrightarrow$ERP validada em tempo de execução. - Eliminação de redundâncias e silos informacionais. - Consistência total dos dados trocados (1:1 entre MES e ERP). - Aumento da eficiência e da confiabilidade da integração. - Compatibilidade com normas IEC 62264 e ISA-95.	- Complexidade de modelação AAS e integração OPC UA. - Necessidade de adoção de padrões internacionais pelas empresas. - Validação restrita a ambiente experimental simples. - Dependência de ferramentas externas (AutomationML-OPC UA Converter, open62541). - Escalabilidade a cenários industriais ainda por comprovar.	O estudo propõe um método inovador baseado em Asset Administration Shell que permite a interoperabilidade e troca de dados em tempo real entre MES e ERP. A arquitetura AutomationML + OPC UA elimina os métodos convencionais baseados em ficheiros, garantindo comunicação padronizada e segura. A validação experimental comprova a eficácia do modelo AAS na sincronização MES$\leftrightarrow$ERP e na eliminação de silos de dados. Apesar da limitação a ferramentas genéricas e ausência de testes industriais, o método estabelece uma base sólida para integração vertical e ciberfísica na Indústria 4.0.

<i>Modeling of RFID-Enabled Real-Time Manufacturing Execution System in Mixed-Model Assembly Lines</i>	Zhixin Yang, Wei Xu, Pak-Kin Wong, Xianbo Wang	2015	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha automática e comunicação em tempo real via RFID (leitores e etiquetas) e redes sem fios no chão de fábrica. Big Data e Análise de Dados - processamento e filtragem de grandes volumes de eventos RFID, deteção de redundâncias e integração no planeamento/escalonamento, enéfitios do MES (frases curtas e diretas)**	- Modelo de MES com RFID validado por simulação numérica. - Redução dos tempos de ciclo e do custo global de produção. - Otimização conjunta de planeamento e sequênciação. - Aumento da fiabilidade e precisão dos dados recolhidos. - Melhoria da rastreabilidade e da visibilidade em tempo real. - Convergência estável do algoritmo proposto. - Incremento da eficiência global da linha de montagem mista.	- Fiabilidade limitada das leituras RFID (dados duplicados ou em falta). - Necessidade de compensação de leitura e filtragem de ruído. - Complexidade computacional (problema NP-hard). - Integração difícil entre planeamento, sensores e escalonamento.	O estudo comprova que a integração da tecnologia RFID no MES potencia a monitorização e rastreabilidade em tempo real, otimizando o planeamento e a execução da produção. A abordagem matemática baseada em decomposição Lagrangiana revelou ganhos de eficiência, redução de custos e maior fiabilidade dos dados. Apesar de limitações técnicas e computacionais, o modelo propõe uma via concreta para MES inteligentes suportados por IoT e análise de dados em tempo real, reforçando o alinhamento com os princípios da Indústria 4.0 e a digitalização integral do chão de fábrica.
<i>Design and Implementation of a Machine Log for PBF-LBM on Basis of IoT Communication Architectures and an ETL Pipeline</i>	Konstantin Poka, Sozol Ali, Waleed Saeed, Benjamin Merz, Martin Epperlein, Kai Hilgenberg	2024	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - integração de dados de sensores e atuadores via OPC UA, MQTT e REST API. Computação em Nuvem - execução distribuída e armazenamento escalável via Docker/MongoDB. Big Data e Análise de Dados - cadeia ETL com normalização e agregação de grandes volumes de dados de processo. Cibersegurança - autenticação via certificados SHA-256 e VPN segura.	- Conexão contínua entre SCADA e MES validada experimentalmente. - Cadeia modular e escalável com baixa latência. - Dados de fabrico estruturados até ao nível do vetor de varrimeto. - Cálculo de indicadores de desempenho (ex.: OEE). - Adoção dos princípios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Re-usable).	- Timestamps pré-computados por camada assumem processo ideal. - Falta de acesso direto ao protocolo proprietário SL2-100 para dados em tempo real. - Integração limitada de sistemas externos (ex.: Melt Pool Monitoring). - Necessidade de sincronização e calibração contínua das fontes de dados.	O trabalho apresenta uma abordagem inovadora para integração de máquinas PBF-LBM com sistemas MES, suportada por uma cadeia ETL baseada em arquiteturas IoT. A solução garante interoperabilidade, rastreabilidade e qualidade dos dados em conformidade com normas internacionais. A validação experimental confirma a capacidade de recolha e análise de dados até ao nível do vetor de varrimeto, permitindo o cálculo de indicadores de desempenho e o apoio à decisão em tempo real. Persistem desafios na aquisição de sinais proprietários e na sincronização temporal, mas a arquitetura proposta representa um avanço relevante para o fabrico aditivo orientado por dados.
<i>Manufacturing Execution System Integration through the Standardization of a Common Service Model for Cyber-Physical Production Systems</i>	Richard Beregi, Gianfranco Pedone, Borbála Hay, József Váncza	2021	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - comunicação de sensores e atuadores em tempo real. Computação em Nuvem e Edge Computing - orquestração e processamento distribuído. Simulação e Gémeos Digitais - Production Administration Shell como espelho digital do processo. Cibersegurança - proteção de interfaces e permissões de escrita OPC UA.	- Mostração experimental em ambiente laboratorial. - Plug-and-play de CPS heterogéneos. - Coordenação entre produção e logística internas. - Conversão de sistemas legados em CPS interoperáveis. - Execução de planos de processo automatizados e rastreáveis.	- Sincronização entre níveis de controlo e programação de campo. - Segurança e restrições de escrita em variáveis OPC UA. - Configuração de permissões de rede e autenticação de CPS. - Necessidade de estandardização adicional para novas tipologias de equipamentos.	A adoção de um modelo de serviço comum baseado em OPC UA e MQTT permite alcançar interoperabilidade e reconfigurabilidade elevadas entre CPS. A arquitetura MESS viabiliza a transformação de equipamentos legados a unidades compatíveis com a Indústria 4.0, reforçando a integração vertical e horizontal. A validação experimental confirmou flexibilidade e plugabilidade eficazes, consolidando o papel do MES como núcleo de orquestração de serviços distribuídos e promovendo a convergência entre o mundo físico e digital na fábrica inteligente.

"Emergency Response Plan", Automated System for Oil Production and Transportation Enterprises	Inna N. Voytyuk; Alexandra V. Kopteva; Alexandr N. Skamyin	2021	Arquitetura	Parcialmente	Internet das Coisas (IoT) - aquisição automática de eventos/estados de sistemas industriais, geolocalização de viaturas, presença de pessoal e dados meteorológicos para contexto situacional. Big Data e Análise de Dados - serviços de análise automatizada, geração de queries e sinais de alarme a partir de registros extensos (tabelas LOG e MIRROR).	- Coordenação operativa mais célere e informada em situações de emergência. - Informação em tempo real sobre rotas de evacuação e presença de pessoal em zonas de risco. - Notificação automática às equipas e sistemas de comunicação/alarme. - Registo e rastreabilidade das ações executadas segundo o plano.	- Integração técnica com múltiplos subsistemas e gestão de interoperabilidade. - Escalabilidade do armazenamento (400 MB-2 GB, consoante retenção) e desempenho. - Governança de dados, segurança e controlo de acessos durante incidentes. - Alinhamento organizacional para adoção de procedimentos digitais de resposta.	A solução proposta estrutura a resposta a emergências em instalações petrolíferas através de uma plataforma tipo SCADA com base de dados corporativa e ligação a sistemas adjacentes. A integração de informação operacional, ambiental e de recursos humanos permite apoiar decisões rápidas e rastreáveis, com emissão de instruções e monitorização da execução. A possibilidade de ligação a um MES amplia a coerência e a visibilidade empresarial. Persistem desafios de integração técnica, escalabilidade e governação de dados, mas o modelo apresenta aplicabilidade prática e potencial de mitigação de risco operacional.
					Internet das Coisas (IoT) - monitorização online e offline da condição dos equipamentos. Arquitetura Orientada a Serviços (SOA) - integração ERP-MES-PMIS. Computação em Nuvem - armazenamento e partilha corporativa de dados de manutenção. Big Data e Análise de Dados - avaliação de risco e desempenho. Cibersegurança - gestão de acessos e fiabilidade da comunicação (ex.: OPC).	- Redução de custos de manutenção corretiva. - Aumento da manutenção preditiva e baseada em condição. - Diminuição de falhas e acidentes operacionais. - Melhoria do OEE via maior disponibilidade dos ativos. - Decisões de manutenção suportadas por risco e desempenho real.	- Défice de históricos estruturados de fiabilidade/manutenção. - Heterogeneidade de sistemas e protocolos industriais. - Adoção organizacional de práticas baseadas em risco. - Necessidade de formação e de governação de dados.	A arquitetura MSI integrada com o MES comprova ganhos em fiabilidade, disponibilidade e segurança, ao unificar dados operacionais e de manutenção e suportar decisões baseadas em risco. A implementação industrial mostra redução de falhas e melhor focalização de recursos, reforçando a importância de interfaces padronizadas e de uma governação de dados robusta. A abordagem constitui um passo consistente para manutenção inteligente em ambiente de processo, embora exija maturidade informacional, integração com sistemas legados e capacitação técnica das equipas.
Securing IIOT Links for Low Power IIoT Devices: Design Considerations for Industry 4.0	Soujanya Mantravadi, Reto Schnyder, Charles Möller, Thomas Dittler Brunoe	2020	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - integração entre MES e PLCs via IIoT. Computação em Nuvem - ligação a plataformas IIoT remotas. Edge Computing - processamento local para reduzir latência. Cibersegurança - protocolos criptográficos, autenticação e gestão de chaves. Simulação e Gémeos Digitais - ambiente laboratorial de teste (Smart Lab).	- Redução de vulnerabilidades IT/OT em dispositivos IIoT de baixo consumo. - Definição de princípios de design seguro para fábricas inteligentes. - Compatibilidade com protocolos ISA-95 e estrutura modular. - Melhoria da interoperabilidade e integridade de dados MES-PLC. - Contribuição para a normalização futura de segurança industrial.	- Limitações de processamento e memória em PLCs e dispositivos IIoT. - Falta de padronização de protocolos criptográficos industriais. - Risco de ataques man-in-the-middle e comprometimento de chaves. - Dependência de conhecimentos interdisciplinares entre cibersegurança e engenharia de produção. - Necessidade de alinhamento entre normas ISA-95 e novas arquiteturas IIoT.	O estudo conclui que o elo IT/OT representa o ponto mais vulnerável das fábricas inteligentes, exigindo soluções de encriptação adaptadas a dispositivos com baixo consumo. A utilização de protocolos certificateless e de modelos distribuídos permite reforçar a autenticidade e integridade das comunicações entre MES e PLCs. A arquitetura proposta mostra viabilidade técnica em laboratório e orienta o desenho de fábricas seguras e modulares, mantendo compatibilidade com a hierarquia ISA-95 e os princípios da Indústria 4.0.

<i>Designing a Cloud-Based MES-SaaS Platform Model in Precision Machining</i>	Internet das Coisas (IoT) – recolha de sensores via PLC/OPC-UA e edge gateway. Computação em Nuvem – plataforma MES-SaaS serverless e armazenamento analítico. Big Data e Análise de Dados – base de dados de grande volume para exploração no MES-SaaS. Cibersegurança – arquitetura multi-tenant com isolamento e políticas centralizadas. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração PLC–edge–nuvem com ativos digitais AAS.	Yejl Do; Jongpil Jeong	2023	Arquitetura	Sim	- Acesso imediato a funcionalidades MES via navegador. - Redução do custo inicial por subscrição e partilha de recursos. - Interoperabilidade entre empresas e soluções através de AAS/EDC. - Modularidade para adaptação por setor e crescimento de PME.	- Planeamento de migração e mapeamento de dados legados para AAS. - Customizações específicas a transportar para SaaS. - Confiança das PME em cloud e requisitos legais/contratuais. - Risco de lock-in de plataformas PaaS e governança de interfaces.	A proposta de plataforma MES-SaaS para maquinação de precisão oferece uma via prática para reduzir custos e aumentar a interoperabilidade, suportando recolha via OPC-UA, normalização AAS e integração EDC. A arquitetura multi-tenant melhora a gestão de segurança e a escalabilidade para PME, mantendo isolamento e atualização centralizada. Persistem desafios de migração, compatibilidade e conformidade, porém o desenho apresentado mostra viabilidade técnica e operacional para transitar de MES on-premises para serviços em nuvem com benefícios de flexibilidade e expansão modular.
						- ↓ Tempo de introdução de dados $\geq 75\%$ (referência Siemens). - ↓ Ciclo de produção $\approx 45\%$. - ↓ Papéis entre turnos $\approx 61\%$. - ↓ Volume total de papel $\approx 56\%$. - ↓ WIP $\approx 24\%$. - ↓ Taxa de refugos $\approx 18\%$. - ↓ Tempo de introdução de novo produto $\approx 27\%$.	- Integração MES-gestão documental com numeração de referência e arquivo de versões. - Necessidade de aprovações formais e gestão de acessos. - Reação rápida a desvios (avarias/atrasos) exigindo replaneamento frequente.	A integração entre MES e gestão eletrónica de documentos aumenta a eficiência operacional e a transparência, encurtando tempos de processo e reduzindo custos associados a paragens e manuseamento documental. A assinatura eletrónica e o arquivo versionado conferem segurança e rastreabilidade às decisões, enquanto o replaneamento dinâmico otimiza a carga dos equipamentos. A abordagem evidencia ganhos mensuráveis na redução de papel, ciclo e WIP, embora dependa de integração governada, qualidade de dados e disciplina organizacional na confirmação e no controlo de versões.
<i>Basis for the model-driven engineering of manufacturing execution systems: Modeling elements in the domain of beer brewing</i>	Internet das Coisas (IoT) – via sensores industriais e interface WS para recolha de dados. Big Data e Análise de Dados – tratamento de dados energéticos e OEE. Simulação e Gémeos Digitais – modelos processuais e funcionais. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração máquina-software com base em modelos.	Xinyu Chen, Fabian Gemein, Stefan Flad, Tobias Voigt	2018	Arquitetura	Sim	- Mostraçõ da viabilidade da abordagem MDE para MES. - Redução do esforço de modelação e maior reusabilidade. - Comunicação uniforme entre máquinas e MES através de WS. - Integração de dados de energia e desempenho (OEE).	- Ausência de ferramenta completa de transformação modelo-sistema. - Escopo restrito ao caso de estudo (cervejaria). - Necessidade de conhecimento prévio para criação de modelos. - Limitação na cobertura de todas as funções MES.	O estudo demonstrou que a abordagem orientada a modelos permite estruturar e automatizar o desenvolvimento de MES, reduzindo a complexidade e o tempo de implementação. A aplicação ao caso da cervejaria evidenciou a eficácia dos elementos de modelação definidos e a adequação da linguagem MES-ML expandida. O modelo proposto constitui a base para futuras extensões a outras indústrias alimentares, integrando padrões como ISA-95 e Weinstephan Standards, embora ainda careça de validação completa com dados reais.

<i>SAMBA – an architecture for adaptive cognitive control of distributed Cyber-Physical Production Systems based on its self-awareness</i>	L. C. Sifalari, H. Kholerdi, A. Bratukhin, N. Taherinejad, A. Jantsch	2018	Arquitetura	Sim	Sistemas Ciber-Físicos (CPS/CPPS) - controle distribuído baseado em entidades cooperativas. Inteligência Artificial (IA) - arquitetura cognitiva com percepção, raciocínio e aprendizagem. Machine Learning - classificadores múltiplos, redes neurais e reinforcement learning para diagnóstico e formação dinâmica de clusters.	- Arquitetura mostrada em simulação com escalabilidade e flexibilidade. - Comunicação e negociação distribuída entre entidades comprovadas. - Capacidade de diagnóstico e previsão dos efeitos de anomalias. - Potencial redução de downtime e esforço de engenharia em CPPS.	A arquitetura SAMBA introduz auto-consciência, decisão cognitiva e colaboração adaptativa em sistemas ciber-físicos de produção, atuando sobre camadas legadas e interagindo com o MES. A verificação por simulação indica viabilidade para detecção, diagnóstico e mitigação distribuída de anomalias, com ganhos esperados em qualidade e resiliência. Persistem como passos futuros a mostração quantitativa em ambiente industrial e o detalhamento dos algoritmos para operação contínua com requisitos de tempo e confiabilidade.
<i>Towards development of cyber-physical systems based on integration of heterogeneous technologies</i>	SangSu Choi, Gyhun Kang	2018	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha e comunicação de dados em tempo real entre equipamentos e MES. Big Data e Análise de Dados - análise de logs MES via Process Mining. Simulação e Gêmeos Digitais - uso de DES e modelos virtuais para otimização de linha. Realidade Aumentada (RA) / Realidade Virtual (VR) - criação de fábrica virtual para visualização e validação de cenários. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - integração total dos subsistemas físicos e digitais.	- Diagnóstico automatizado de gargalos e baixo rendimento. - Redução do tempo de preparação e análise de simulações. - Otimização de <i>throughput</i> e fluxo de materiais validada em ambiente virtual. - Ligação direta entre planeamento, execução e reconfiguração fabril. - Complexidade elevada da integração multi-sistema. - Custos iniciais de implementação e necessidade de competências multidisciplinares. - Falta de padrões unificados e maturidade nas interfaces PLM-DES-VR. - Dificuldade em quantificar ganhos em contexto real de PME.	O estudo mostra que a integração de tecnologias heterogêneas sob uma arquitetura ciber-física baseada em MES e PLM constitui um caminho viável para a fábrica inteligente. A abordagem permite diagnósticos, simulações e otimizações contínuas com forte apoio à decisão e à interoperabilidade. Contudo, a implementação em larga escala requer padronização, maturidade tecnológica e redução da complexidade de integração, especialmente para pequenas e médias empresas que enfrentam restrições económicas e técnicas.
<i>Virtual Factory Model Development for AI-Driven Optimization in Manufacturing</i>	E. L. Itskovich	2016	Arquitetura	Parcialmente	Cibersegurança - assinatura eletrónica para decisões de gestão e proteção contra acesso não autorizado (requisitos de proteção, assinaturas eletrónicas).	- Consolidação fiável de balanços de materiais. - Planeamento e controlo operacionais suportados por dados atuais e históricos. - Relato flexível sem programação (editores/SOL/portais web). - Fundamentação para estimativas de eficiência e retorno. - Independência do integrador/consultor e qualificação técnica. - Lacunas de automação no nível inferior que impedem fornecimento de dados. - Necessidade de atualização contínua do plano diretor ao longo dos anos.	O artigo estabelece uma orientação sistemática para conceção e implementação de MES em indústrias de processo, enfatizando avaliação objetiva do estado da automação, definição clara de requisitos e seleção independente de soluções. Defende uma implementação faseada baseada na prontidão dos dados e no impacto esperado, com revisão periódica do plano para mitigar a obsolescência. A abordagem fornece bases técnicas e organizacionais para interoperabilidade e governança, embora não apresente validação empírica quantitativa.

<i>Using immune designed ontologies to monitor disruptions in manufacturing systems</i>	Nawel Bayar; Saber Darmoul; Sonia Hajj-Gabouj; Henri Pierreval	2016	Arquitetura	Parcialmente	Nenhuma das tecnologias padrão é explicitamente nomeada; refere integração com ERP/MES e aquisição on-line via SCADA. Digitalização e operação on-line integradas a ERP/MES/SCADA, sem evidência direta de IoT/Cloud/DT/IA explicitamente implementadas.	- Detecção on-line de perturbações com dados atuais do processo. - Identificação de consequências e riscos a jusante (qualidade, prazos, inventário). - Recomendações de decisões de reação (reparo, triagem, negociação). - Protótipo mostra relevância no exemplo da soldadura de tubos.	- Necessidade de modelação/curadoria contínua de ontologias e regras. - Falta de validação quantitativa em ambiente industrial amplo. - Interoperabilidade e escalabilidade com legacy (ERP/MES/SCADA).	A abordagem imuno-inspirada com ontologias e agentes mostra potencial para monitorização e controlo on-line de perturbações, com deteção, propagação de efeitos e apoio à decisão integrados. A compatibilidade com ferramentas como ETAF/TA e sistemas ERP/MES facilita a adoção. Contudo, carece de métricas de desempenho em contexto real alargado e de maior automatização na gestão de conhecimento, bem como de estudos de interoperabilidade e escalabilidade.
<i>The Methodology of the Development of the Manufacturing Information Acquisition System (MIAS) for Production Management</i>	Grzegorz Ćwikła	2014	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – via RFID, sensores, PLC, SCADA e OPC. Big Data e Análise de Dados – agregação e pré-processamento em bases de dados industriais Historian. Computação em Nuvem – acesso remoto e interoperabilidade entre sistemas.	- Redução do tempo de recolha e processamento de dados. - Melhoria da visibilidade e rastreabilidade das operações. - Suporte ao controlo e decisão operacional com dados atualizados. - Uniformização da comunicação entre chão de fábrica e ERP.	- Dificuldade de integração em ambientes com baixo nível de automação. - Limitações impostas por protocolos e interfaces heterogêneos. - Custos de implementação e manutenção de sensores e bases de dados industriais.	A metodologia MIAS constitui uma proposta robusta para integrar e automatizar a recolha de dados no contexto industrial, garantindo ligação fiável entre as camadas operacionais e de gestão. Mostra-se que o modelo é adaptável a diferentes tipos de processos e aumenta significativamente a eficiência informacional. O estudo evidencia que a integração MIAS–MES–ERP promove a transformação digital das operações e reduz a latência entre evento produtivo e decisão, contribuindo para os princípios da Indústria 4.0.
<i>Design of Manufacturing Execution System for FMCG Industries</i>	Atindam Banerjee, Naveen Bommu, Prateek Agarwal, N. Jaisankar	2013	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – via sensores e controladores industriais (PLC, SCADA, OPC). Computação em Nuvem – transferência de dados ERP–MES através de servidor global. Big Data e Análise de Dados – processamento e análise de dados de produção e qualidade em tempo real. Sistemas Ciber-Físicos (CPS/CPPS) – integração dos sistemas de controlo, MES e ERP num ecossistema digital interligado.	- Comunicação ERP–MES validada com transferência de 20 ficheiros XML/s. - Redução de custos e de intervenção manual. - Melhoria da precisão e da velocidade de recolha de dados. - Estrutura escalável para implementação em múltiplas fábricas.	- Dificuldade de interoperabilidade entre sistemas heterogêneos. - Necessidade de garantir segurança e fiabilidade na troca de dados. - Complexidade na parametrização de eventos e processos em lote.	O estudo mostra a viabilidade de uma arquitetura MES específica para a indústria FMCG, capaz de integrar dados de produção em lote com sistemas ERP de forma eficiente. A implementação prototípica valida a transferência bidirecional de dados em tempo real, reduzindo custos e aumentando a rastreabilidade. O modelo proposto constitui um passo relevante para a digitalização de processos FMCG e oferece potencial de adaptação a outros setores industriais, alinhado com os princípios da Indústria 4.0.

RFID Based e-quality Tracking in Service-oriented Manufacturing Execution System	FU Yingbin; JIANG Pingyu	2012	Arquitetura	Parcialmente	- Obtenção em tempo real de dados de estado e qualidade das peças. - Melhorar a rastreabilidade do processo produtivo. - Validação experimental em Caso Industrial real. - Aumento da eficiência e redução de erros de registo.	- Necessidade de módulos adicionais de tratamento de erros de transporte. - Ausência de comunicação direta com CNC em algumas máquinas. - Falta de padronização para "Kanbans" de operadores e transporte. - Limitações na interoperabilidade de hardware heterogéneo.	O modelo e-QT baseado em RFID demonstrou ser eficaz para recolher e processar dados de estado e qualidade em tempo real, confirmando a viabilidade técnica do conceito so-MES. A arquitetura proposta aumenta a visibilidade e o controlo dos processos de maquinação, constituindo uma base sólida para integração de funções de qualidade no MES. Persistem, contudo, desafios relacionados com comunicação máquina-sistema e otimização do fluxo de transporte, recomendando-se futuras investigações em deteção de erros e integração plena com CNC e módulos de planeamento dinâmico.	
					Internet das Coisas (IoT) – via RFID e sensores industriais.	- Melhoria da resposta a falhas e perturbações. - Redução dos tempos de processo e dos inventários em curso. - Maior estabilidade e robustez do controlo distribuído. - Validação por simulação de cenários industriais reais.	- Necessidade de validação comportamental de emergência e estabilidade. - Integração com sistemas ERP/PLC existentes. - Falta de padronização para agentes industriais interoperáveis. - Escalabilidade em ambientes complexos.	O @MES baseado em agentes autónomos mostra ser uma alternativa viável aos MES centralizados, oferecendo maior agilidade e robustez na execução de ordens e no reagendamento em tempo real. A integração das funções de planeamento e controlo num modelo autoadaptativo melhora a utilização de recursos e a resposta a falhas. Contudo, a implementação prática exige ferramentas de verificação de comportamentos emergentes e mecanismos de interoperabilidade entre agentes industriais.
Agent-based Modeling and Simulation of an Autonomic Manufacturing Execution System	Milagros Rolón; Ernesto Martínez	2012	Arquitetura	Sim	Inteligência Artificial (IA) - aplicada através de sistemas multi-agente para decisão distribuída e auto-gestão. Simulação e Gémeos Digitais - utilizada via simulação baseada em agentes (ABMS) para modelar e prever comportamentos emergentes do MES. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - implementados conceitualmente através de agentes com sensores e atuadores virtuais integrados no ciclo MAPE.			
Functional Analysis of Manufacturing Execution System Distribution	Aleksey Bratukhin; Thilo Sauter	2011	Arquitetura	Sim	Inteligência Artificial (IA) - através de sistemas multi-agente e holónicos para tomada de decisão distribuída. Simulação e Gémeos Digitais - utilizada para análise comparativa de arquiteturas e avaliação de desempenho qualitativo. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - conceito subjacente à ligação entre entidades físicas (recursos, ordens) e níveis de controlo.	- Distribuição parcial das funções MES aumenta a flexibilidade. - Melhor resposta a mudanças no fluxo de ordens e no chão-de-fábrica. - Arquiteturas mediadas e hierárquicas equilibram flexibilidade e otimização. - Recomendação de modelos híbridos (DI, MC, HDI) para ambientes dinâmicos.	- Definir o grau ótimo de distribuição das funcionalidades. - Gerir a sobrecarga de comunicação e coordenação. - Garantir consistência global e evitar replaneamentos cíclicos. - Falta de padrões consolidados para integração distribuída MES/ERP.	A análise mostra que a distribuição das funcionalidades MES é essencial para responder à crescente dinamicidade dos sistemas de produção. As arquiteturas distribuídas, baseadas em agentes e entidades cooperantes, aumentam a flexibilidade e adaptabilidade, embora impliquem maior esforço de coordenação. Modelos intermédios, como a Distributed Intelligence e Hierarchical Distributed Intelligence, oferecem equilíbrio entre otimização e resposta dinâmica, constituindo alternativas viáveis ao MES centralizado e um passo relevante para a integração com os conceitos da Indústria 4.0.

Towards a Formal Specification Framework for Manufacturing Execution Systems	Maria Witsch; Birgit Vogel-Heuser	2012	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – integração de sensores, sinais e comunicação OPC entre MES e sistemas técnicos. Big Data e Análise de Dados – recolha e interpretação de dados técnicos e de processo para especificação e optimização. Simulação/Gêmeos Digitais – potencial introduzido através de métodos formais e simulação de modelos. Cibersegurança - foco na integridade e consistência de dados e nas ligações ERP–automação.	- MES-ML avaliado em quatro projectos industriais. - Compreensão interdisciplinar elevada (5,4 / 6). - Especificação mais rápida e transparente. - Identificação de inconsistências e oportunidades de melhoria. - Maior qualidade e aceitação dos modelos de especificação.	- Curva de aprendizagem inicial. - Integração de domínios heterogéneos. - Necessidade de interoperabilidade entre modelos. - Ausência de padronização formal. - Complexidade de modelação. - Dependência de ferramentas de suporte.	O estudo mostra que o MES-ML reduz ambiguidades de especificação e melhora a compreensão entre áreas, permitindo verificação automática de consistência e documentação audível. A integração ERP–automação é facilitada por sintaxe e semântica formais. Desafios: padronização, curva de aprendizagem e maturidade de ferramentas. Próximos passos: integração com simulação/testes e maior adopção industrial de modelos formais.
A model-driven approach for engineering customizable MES with the application to the food and beverage industry	Xinyu Chen; Christoph Nophut; Tobias Voigt	2021	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – sensores e recolha automática de dados de produção via Weihenstephan Standard. Computação em Nuvem – suporte à geração e integração descentralizada de MES. Big Data e Análise de Dados – análise de eficiência energética e produtiva. Simulação/Gêmeos Digitais – modelação e melhoria contínua baseada em dados reais.	- MES gerado automaticamente em seis fases. - Redução significativa do esforço de engenharia. - Aplicação validada em dois casos industriais reais. - Melhoría de eficiência e transparência. - Capacidade de extensão sem programação adicional. - Sustentabilidade do ciclo de vida do MES.	- Compatibilidade limitada do Weihenstephan Standard. - Ausência de funções em tempo real (planeamento, rastreabilidade, qualidade). - Necessidade de ampliar bibliotecas funcionais. - Adaptação a outros sectores industriais. - Dependência de ferramentas de modelação específicas.	A abordagem orientada por modelos mostra viabilidade para gerar MES personalizáveis com menor esforço de programação e maior reutilização, validada em casos alimentares e de bebidas. A integração estruturada e os dados operacionais melhoram eficiência e transparência. Limitações: dependência do Weihenstephan Standard e cobertura parcial de tempo real. Futuro: expandir bibliotecas funcionais e analítica avançada.
A Vertical and Cyber-Physical Integration of Cognitive Robots in Manufacturing	Volker Krueger, Amaud Chazouille, Matthew Crosby, Antoine Lashier, Mikkel Rath Pedersen, Francesco Rovida, Lazaros Nalpanidis, Ronald Petrick, César Toscano e Germano Veiga	2016	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – via integração de sensores e comunicação de dados em rede: Robôs Autónomos - robôs cognitivos STAMINA. Simulação e Gêmeos Digitais - modelo do mundo virtual e sincronização com ambiente físico; Computação em Nuvem - coordenação distribuída e planeamento multi-agente.	- Redução do tempo de montagem. - Execução automática e precisa de kits. - Elevada fiabilidade (85 %). - Comunicação direta MES↔robô. - Atualizações automáticas do modelo de produção. - Suporte à produção personalizada e resiliente.	- Garantir consistência entre mundo real e modelo virtual. - Lidar com erros humanos e desvios físicos. - Elevada complexidade de programação e calibração. - Necessidade de planeamento multi-agente robusto.	O estudo mostra que a integração vertical e ciberfísica entre MES e robôs cognitivos permite um avanço significativo na automação flexível. A arquitetura proposta (SkIROS + planeador logístico) prova ser fiável e escalável, reduzindo tempos de programação e aumentando a autonomia operacional. O robô atua como extensão física do MES, tomando-se "olhos e ouvidos" do sistema. A abordagem valida o potencial dos sistemas ciber-físicos e robôs cognitivos para fábricas inteligentes, destacando a necessidade de sincronização contínua entre o modelo digital e o ambiente real.

A Federated Information System Framework for Vertical Integration	Fadi El Kalach; Jitendra Solanki; Anand Todkar	2024	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - via OPC UA (aquisição) e MQTT (mensageria). Big Data e Análise de Dados - através de RDF/Knowledge Graphs para interoperabilidade semântica e consulta.	- Validação experimental com sistema de caldeira monitorizado. - Recuperação colaborativa de dados entre nós autônomos. - Acesso simplificado via GraphOL unificado. - Maior modularidade, escalabilidade e segurança. - Continuidade operacional mesmo com falhas em nós individuais.	- Elevada exigência computacional em cada nó federado. - Atrasos potenciais na propagação de consultas. - Necessidade de normalização semântica rigorosa entre modelos OPC UA e RDF. - Falta de testes de desempenho em ambientes industriais de larga escala.	O estudo apresenta um enquadramento federado que reforça a integração vertical entre sistemas empresariais e operacionais, superando limitações dos modelos centralizados. A combinação de OPC UA, Knowledge Graphs e GraphQL mostra interoperabilidade e resiliência superiores, promovendo a convergência entre tecnologias de informação e operação. O protótipo validado evidencia funcionamento autónomo dos nós, execução distribuída de consultas e elevada tolerância a falhas. Apesar dos desafios de processamento e normalização, o modelo proposto constitui uma base sólida para arquiteturas distribuídas de MES orientadas à Indústria 4.0.
					Não evidenciadas explicitamente. Consolidação de tecnologias como IoT, OPC UA ou Computação em Nuvem, centrando-se em princípios de workflow e execução distribuída.	- Estrutura conceptual para MES distribuídos baseada em workflows. - Clarificação de papéis, estados, eventos e exceções no controlo. - Base para reconfiguração de processos e escalabilidade. - Diretrizes para interoperabilidade entre sistemas.	- Modelação exaustiva de processos complexos e variantes. - Sincronização temporal e consistência em redes distribuídas. - Gestão de falhas e compensações em execuções longas. - Ausência de padrões de interoperabilidade amplamente adotados.	A perspetiva de workflow fornece uma base sólida para conceber MES distribuídos, permitindo explicitar processos, papéis e regras de coordenação e oferecendo mecanismos de monitorização e gestão de exceções. O enquadramento antecipa necessidades de interoperabilidade e escalabilidade típicas de ambientes de fabrico distribuído, embora dependa de padrões e infraestruturas que, à data, ainda eram incipientes. O estudo estabelece fundamentos metodológicos que mais tarde seriam aplicados em arquiteturas orientadas a serviços e integrações mais maduras no contexto da Indústria 4.0.
A Mobile Dashboard for Analytics-Based Information Provisioning on the Shop Floor	Christoph Gröger; Christoph Stach; Bernhard Mitschang; Engelbert Westkamper	2016	Arquitetura	Parcialmente (digitalização analítica e mobilidade; não centra em IoT/Cloud industriais)	Big Data e Análise de Dados - data mining, métricas e repositório de conhecimento. Inteligência Artificial (IA) / Machine Learning - árvores de decisão para previsão e recomendações. Cibersegurança - RBAC, encriptação, segurança Wi-Fi/TLS, autenticação multifator.	- Viabilidade técnica mostrada com protótipo OPDM. - Otimização proativa via previsões e recomendações prescritivas. - Acesso móvel e sensível ao contexto para decisões no terreno. - Melhoria da agilidade e do ciclo de melhoria contínua baseado em dados.	- Necessidade de app móvel dedicada e gap de apresentação na plataforma base. - Integração de comunicação síncrona externa (p.ex., conference systems). - Gestão de privacidade/localização e calibração de contexto no shop floor.	O OPDM mostra que dashboards móveis com análises preditivas e prescritivas, suportados por um warehouse holístico e serviços de data mining, permitem disponibilizar informação relevante em tempo útil no chão de fábrica. A avaliação no caso automovel evidencia aplicabilidade, benefícios na responsividade e suporte à decisão, e viabilidade técnica com arquitetura cliente-servidor e app Android. Persistem desafios na integração de comunicação síncrona, segurança e gestão de contexto, mas a solução constitui base sólida para operações analíticas shop-floor-centric.

<i>Framework and Deployment of a Cloud-Based Advanced Planning and Scheduling System</i>	Li-Chih Wang; Chun-Chih Chen; Jen-Li Liur; Pei-Chun Chu	2021	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha de dados de sensores e equipamentos fabris. Computação em Nuvem – AWS (EC2, Lambda, S3, CloudWatch). Big Data e Análise de Dados - análise de desempenho e planeamento preditivo. Machine Learning - reforço da qualidade de sequenciação com métodos de otimização. Cibersegurança - gestão de acessos e encriptação na nuvem.	- Tempo de computação de 46 s para 163 ordens. - Redução do tempo total de planeamento de dois dias para algumas horas. - 95% Das encomendas concluídas antes do prazo. - Melhoria de estabilidade e qualidade dos dados de planeamento. - Elevada flexibilidade e adaptação a novas linhas e produtos.	- Necessidade de recolha e validação exaustiva de dados de produção. - Dependência da infraestrutura de nuvem pública (AWS). - Formação intensiva de utilizadores e consultores. - Dificuldade inicial na definição de parâmetros de simulação realistas.	O estudo mostra que o sistema C-APS em nuvem é uma solução economicamente viável e tecnicamente robusta para o planeamento avançado em PME industriais. A integração com ERP e MES reduz custos, simplifica a modelação e assegura planeamentos rápidos e consistentes. O modelo de fábrica virtual e o motor de simulação discreta validam a eficácia operacional e a flexibilidade para adaptações futuras. O enquadramento proposto constitui um avanço relevante na digitalização da produção e na convergência entre planeamento, execução e computação em nuvem no contexto da Indústria 4.0.
	Laurence C. Magalhães; Luciano C. Magalhães; Jhonatan B. Ramos; Luciano R. Moura; Renato E. N. de Moraes; João B. Gonçalves; Wílân H. Hisatugu; Marcelo T. Souza; Luis N. L. de Lacalle; João C. E. Ferreira	2022	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) – aquisição em tempo real de sensores/PLC via TCP. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - ligação níveis 0–2 com DT e sistemas cliente. Simulação e Gémeos Digitais - conceção e execução do DT do FMS. Computação em Nuvem - proposta para armazenamento/partilha futura. Realidade Aumentada (RA) - perspetivada para manutenção/treino no ecossistema DT.	- DT operacional com simulação sincronizada do FMS. - Tempos simulados ~5% acima dos reais (boa aderência). - Indicadores de produção acessíveis em tempo real a operadores e gestores. - Processo com Ra=0,25 µm (ISO IT2–IT3) em peça torneada. - Viabilidade com low-cost hardware/software.	- Integração DT↔CPS complexa: protocolos, wrappers PLC, volumes de dados. - Necessidade de plataforma de controlo open-source para heterogeneidade. - Garantia de atualização bidirecional e sincronização fiel.	A conceção do gémeo digital para um FMS, suportada por módulos ERP/MES e integração com sensores/PLC, demonstrou monitorização e simulação eficazes em tempo quase real, com aproximação temporal aos ciclos reais e disponibilização de indicadores para decisão. A arquitetura alinhada com ISA-95 mostrou-se expedita e economicamente viável. Perspetiva-se a evolução com computação em nuvem, realidade aumentada e integração aberta para fortalecer interoperabilidade, formação e manutenção, ampliando o papel do DT como núcleo de operações inteligentes em fábrica.

<i>Design and Implementation of an HPCS-Based PCB Smart Factory System for Next-Generation Intelligent Manufacturing</i>	Jinyoub Kim, Dongjoon Seo, Jisang Moon, Junee Kim, Hayul Kim, Jongpil Jeong	2022	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - sensores, OPC-UA, RFID, redes industriais. Inteligência Artificial (IA) - modelo U-Net para inspeção de qualidade. Computação em Nuvem - integração de dados e serviços MES. Big Data e Análise de Dados - monitorização e predição em tempo real.	- Acurácia da inspeção aumentou de 87% para 96,7% com IA. - Taxa de operação do equipamento aumentou de 70% para 88,7%. - Taxa de defeitos reduziu de 300 ppm para 178 ppm. - Sistema de recolha e visualização em tempo real implementado com sucesso. - Melhoría global de desempenho de 33,6% e taxa de cumprimento de metas de 138,9%.	- Elevada complexidade de integração de IA, MES e IoT. - Necessidade de qualificação de operadores para manusear dados e interpretar resultados. - Custos iniciais associados à implementação e à infraestrutura digital. - Dependência da fiabilidade da rede e da qualidade dos dados recolhidos.	O estudo mostra que a integração de MES, IoT e IA, segundo a arquitetura HPCS 2.0, aumenta a competitividade e eficiência das fábricas de PCB, permitindo maior rastreabilidade, menor taxa de defeitos e controlo em tempo real. A solução valida evidência ganhos significativos de produtividade e qualidade, confirmando o valor da transformação digital na indústria eletrónica. Contudo, são ainda necessários desenvolvimentos adicionais para otimizar a autonomia do sistema e reduzir a intervenção humana, reforçando a integração entre IA, predição e controlo automático.
<i>A Fog Computing Based Cyber-Physical System for the Automation of Pipe-Related Tasks in the Industry 4.0 Shipyard</i>	Tiago M. Fernández-Caramés; Paula Fraga-Lamas; Manuel Suárez-Albela; Manuel A. Díaz-Bouza	2018	Arquitetura	Sim	Internet das Coisas (IoT) - active RFID, leitores distribuídos e aquisição contínua de RSSI. Computação em Nuvem - serviços corporativos (ERP SAP, PLM Windchill, IoT ThingWorx) na cloud interna. Big Data e Análise de Dados - módulo de business intelligence para deteção de eventos e análise de amostras SSI. Realidade Aumentada (RA) - interfaces IAR suportadas por fog para streaming/cache de dados	- Integração e testes bem-sucedidos com MES Siemens Simatic IT. - Fog gateways entre 5x e 481x mais rápidos do que cloud sob cargas regulares. - Maior taxa de processamento de amostras sob cargas elevadas até ~40 000 tags. - Eliminação de bottlenecks de papel e uploads manuais. - Mais produtividade.	- Ambiente hostil: metal, humidade 40-95%, temperaturas elevadas, substâncias corrosivas e ruído eletromagnético. - Distâncias de 100-250 m exigem redes/replicadores e posicionamento de gateways. - Flutuações de largura de banda e latência na cloud partilhada. - Saturação de fog acima de ~50 000 tags sem balanceamento.	O CPS baseado em fog computing reduziu significativamente a latência e aumentou a robustez da rastreabilidade em estaleiro, mostrando superioridade face à abordagem cloud em cargas típicas de oficina. A integração com MES permitiu automatizar eventos, atualizar tarefas e localizar materiais com rapidez, contribuindo para a digitalização e eficiência operacional. A escalabilidade requer múltiplos gateways e governação de comunicação; ainda assim, o estudo valida fog+IoT+MES como via eficaz para uma Shipyard 4.0 com menores atrasos e maior taxa de processamento.
<i>Chat with MES: LLM-driven user interface for manipulating garment manufacturing system through natural language</i>	Zhaolin Yuan; Ming Li; Chang Liu; Fangyuan Han; Haolun Huang; Hong-Ning Dai	2025	Arquitetura	Sim	Inteligência Artificial (IA) - LLM/Agente conversacional, Text2SQL e reescrita de pedidos. Machine Learning - planeamento multi-passo e geração/validação de operações.	- Execução correta em 80% dos 55 pedidos. - + 9,1% Com reescrita de pedidos. - + 18,2% Com planeamento multi-etapas. - Redução de custos de GUI e esforço de manutenção. - Interação mais acessível para operadores e gestores.	- Ambiguidade na linguagem natural dos utilizadores. - Risco de operações perigosas sem controlo transaccional. - Custos computacionais de fluxos multi-etapas. - Transferência para ambiente real requer hardening e políticas de segurança.	A integração de LLMs no MES viabiliza uma interface conversacional que substitui a GUI, mantendo controlo e rastreabilidade. O protótipo CWM alcança elevada precisão em cenário simulado e evidencia ganhos de usabilidade e manutenção. A adoção industrial requer reforço de governação, políticas de segurança e garantias transacionais, mas o conceito estabelece um caminho sólido para MES cognitivos alinhados com a Indústria 4.0.

<i>Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) for Industry 4.0: Overcoming buyer-provider information asymmetries through knowledge sharing dynamics</i>	Verónica M. Tabim; Néstor F. Avala; Giuliano A. Marodin; Guilherme B. Benitez; Alejandro G. Frank	2024	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – sensores e recolha de dados em tempo real. Computação em Nuvem – integração de sistemas e dados distribuídos. Big Data e Análise de Dados – processamento e correlação de informação operacional. Inteligência Artificial (IA) – análise preditiva e apoio à decisão autónoma. Simulação/Gémeos Digitais – suporte ao planeamento e ao controlo inteligente da produção.	- Modelo conceptual que relaciona complexidade do MES e intensidade de partilha de conhecimento. - Redução de assimetrias de informação. - Melhoria da cooperação comprador-fornecedor. - Implementações mais alinhadas e sustentáveis. - Três níveis de colaboração (caixa preta, branca e cinzenta) identificados e validados empiricamente.	- Diferenças de maturidade tecnológica. - Resistência à partilha de conhecimento. - Interpretações distintas do conceito de MES 4.0. - Falta de padronização. - Déficit de comunicação técnica. - Dificuldade em atingir integração total. - Dependência de confiança mútua e mediação externa.	O estudo evidencia que dinâmicas de partilha de conhecimento reduzem assimetrias comprador-fornecedor e aumentam o sucesso de implementação do MES 4.0. O modelo orienta níveis de colaboração ao longo do contrato, promovendo alinhamento, confiança e resultados operacionais. Desafios incluem maturidade digital desigual e relutância em partilhar conhecimento. Futuro: mecanismos formais de colaboração e métricas de governação.
					Internet das Coisas (IoT) – recolha de dados por sensores e identificação (RFID, código de barras, MDC) entre máquinas e MES. Big Data e Análise de Dados – processamento e análise em tempo real ou quase real de dados de produção e indicadores compostos. Cibersegurança - restrição do controlo ao nível SCADA devido ao aumento de ciberataques; separação SCADA/MES.	- OEE = 80 % em quatro máquinas. - Valores "muito bons" face a referências industriais. - OOE/TEEP calculados para perdas mais amplas. - Mediana TEEP 49–71 % consoante a máquina. - Identificação de áreas determinantes da instabilidade do sistema. - Controlo da variabilidade em tempo real após implementação do algoritmo. - Base para balanceamento de tarefas e redução de desperdício do tipo mura.	- OEE pouco fiável em produção de séries curtas. - Heterogeneidade de máquinas e integração. - Necessidade de dados consistentes e de configuração específica. - Sensibilidade a ciberameaças. - Dependência de metodologia analítica (parametrização bayesiana).	A personalização do MES com inferência bayesiana e índice de variabilidade mostra melhor controlo em produção altamente variável, complementando OOE/OOE/TEEP. Os resultados identificam instabilidades e suportam balanceamento operacional. Desafios: qualidade de dados e parametrização. Futuro: validação industrial sustentada e integração com planeamento e manutenção preditiva.
<i>Personalization of the MES System to the Needs of Highly Variable Production</i>	B. Zwojńska; A. A. Tubis; M. Kostorzewski; N. Chamier-Gliwiński	2020	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - ligação de sensores, PLC e dispositivos através de gateway Siemens IoT2040 e protocolo MQTT para publicação de dados na nuvem. Computação em Nuvem - armazenamento e visualização na plataforma IBM Bluemix (Node-RED). Robôs Autónomos - cobot Baxter de braço duplo e AGV Turtlebot para movimentação automática de materiais. Cibersegurança - controlo seguro de tensões na fase de teste (Modbus e relés com bloqueio lógico). Realidade Aumentada (RA) - referida em trabalhos futuros como ferramenta para assistência remota e HMI imersiva.	- Produtividade + 20 %. - Redução da taxa de desperdício em ≈ 15 %. - Melhoria da eficiência geral do equipamento em 10 %. - Dados de produção em tempo real para decisão rápida. - Rastreabilidade e controlo total de ordens e recursos. - Melhor interação homem-máquina com cobot colaborativo.	- Integração complexa entre protocolos heterogêneos (Modbus, OPC, MQTT). - Limitação da escalabilidade fora do ambiente piloto. - Custo de hardware IoT. - Necessidade de formação dos operadores para ambientes ciberfísicos. - Ausência de normas únicas para RA e cobots.	A solução valida integração vertical ERP-MES-chão de fábrica com cobot e AGV, evidenciando ganhos de produtividade, qualidade e OEE. A arquitetura OPC/MQTT e cloud melhora rastreabilidade e decisão em tempo real. Desafios: integração de protocolos, custos e escalabilidade fora do piloto. Futuro: normalização e testes em contextos industriais maiores.
					Smart CPS: vertical integration overview and user story with a cobot			

<i>A method to align functionalities of a manufacturing execution system with competitive priorities</i>	Miguel Afonso Sellitto; Elisandro João de Vargas	2020	Caso Industrial	Parcialmente	Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - monitorização em tempo real do chão de fábrica. Big Data e Análise de Dados - tratamento estatístico das funcionalidades e indicadores de desempenho.	- Identificação de funções críticas para custo, qualidade e flexibilidade. - Melhoria do alinhamento entre estratégia e execução. - Classificação clara de funcionalidades a explorar, melhorar ou descontinuar. - Ganhos de eficiência e sincronização da produção. - Método replicável em outros setores industriais.	- Consistência de dados. - Dificuldade de atualização de funcionalidades. - Falta de integração preditiva. - Heterogeneidade de sistemas. - Dependência de competências humanas.	O estudo mostra que a análise estruturada das funcionalidades MES permite alinhar melhor a execução operacional com as prioridades competitivas da empresa. Os dois casos revelaram funcionalidades altamente relevantes e bem implementadas, bem como outras desalinhadas, que devem ser descontinuadas ou melhoradas. A metodologia AHP prova ser eficaz para avaliar o contributo e qualidade das funções MES, permitindo replicação noutras setores. Persistem desafios na integração preditiva e na modernização de sistemas. Futuro: usar analítica e IA para ajustar funcionalidades em tempo real e reforçar o alinhamento entre estratégia e execução industrial.
					Computação em Nuvem - replicação e sincronização de dados entre sistemas ARAS PLM e MES via servidores PostgreSQL. Big Data e Análise de Dados - armazenamento e tratamento massivo de dados de produção e anomalias no KBS.	- Redução dos ciclos de tentativa e erro na engenharia de processos. - Digitalização do conhecimento implícito dos operadores. - Reutilização de dados de anomalias e verificações em novos projetos. - Melhoria do fluxo informacional entre design e produção. - Base de dados central KBS atualizada automaticamente via replicação. - Visão global do estado de produção e feedback estruturado ao PLM.	- Definir KPIs coerentes com objetivos estratégicos. - Avaliar impactos quantitativos (tempo de conceção, qualidade, rejeições). - Integrar futuramente o ERP. - Assegurar consistência de dados entre múltiplos sistemas e departamentos.	O estudo mostra que a integração PLM-MES através de um sistema baseado em conhecimento de código aberto melhora a reutilização de dados e a aprendizagem organizacional em ambientes de produção personalizada. A abordagem reduz o tempo de projeto de processos e preserva o know-how operacional. O uso de ARAS PLM e PostgreSQL prova a viabilidade técnica e económica da solução. Persistem desafios na definição de métricas e na expansão para ERP, mas a estrutura mostra-se um passo relevante rumo à integração plena de sistemas na Indústria 4.0.
<i>A Radio Frequency Identification-Enabled Real-Time Manufacturing Execution System for One-of-a-Kind Production Manufacturing: A Case Study in the Mould Industry</i>	Kuo-Chung Wang; Fan-Tien Cheng; Kuang-Yow Lian; Chia-Hui Yang; Yuan-Hsuan Chang	2012	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - conectividade entre leitores RFID, servidores e MES para recolha automática de dados. Big Data e Análise de Dados - armazenamento e processamento contínuo de registos de produção. Computação em Nuvem - infraestrutura distribuída de dados e integração ERP-MES.	- Redução de 80 % nos erros de registo e atualização. - Eliminação de formulários manuais de produção. - Atualização em tempo real do estado de ordens e recursos. - Melhoria de 25 % na eficiência de rastreabilidade. - Ligação direta ERP-MES com sincronização imediata.	- Elevado investimento inicial em leitores e etiquetas RFID. - Limitações de leitura em ambientes metálicos e húmidos. - Necessidade de manutenção e calibração periódica dos dispositivos. - Integração complexa com sistemas legados ERP. - Gestão de grandes volumes de dados RFID em tempo real.	O estudo comprova que a integração de RFID no MES permite rastreabilidade total e comunicação imediata entre chão de fábrica e planeamento, transformando a produção unitária em processo digitalizado e visível. O sistema implementado na indústria de moldes reduziu erros e aumentou a eficiência operacional, mostrando a viabilidade de um MES habilitado por IoT para contextos OKP. Apesar dos custos iniciais e desafios técnicos de leitura e integração, a solução representa um passo decisivo para a convergência MES-IoT em fábricas inteligentes.

<i>Data Acquisition System of Compound Semiconductor Fabrication</i>	Seung Woo Lee; Hwa Ki Lee	2007	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha automática de dados via sensores e protocolo GEM. Big Data e Análise de Dados – armazenamento e análise contínua de medições de processo e inspeção.	- Redução do tempo de ciclo de 8 → 6 semanas. - Poupança > 50 % no tempo de preparação de trabalho. - Melhoria de rendimento de 70 → 80 %. - Cumprimento rigoroso do calendário de entregas. - Fiabilidade ≥ 95 % das informações de processo. - Resposta imediata a problemas identificados em tempo real.	- Necessidade de protocolos padronizados GEM em todos os equipamentos. - Integração complexa com sistemas legados. - Interferência de rede sem fios em ambiente FAB. - Dependência de qualidade dos dados recolhidos. - Necessidade de manutenção contínua dos dispositivos e calibragem dos sensores.	GEM é essencial para a transição das fábricas de semicondutores compostos para ambientes MES em tempo real. A implementação reduziu tempos de ciclo, melhorou o rendimento e aumentou a fiabilidade dos dados de processo, provando a eficácia da recolha automática e digital. Apesar de desafios técnicos na rede e calibração, o sistema cria a base para uma gestão integrada de produção e fortalece a competitividade no contexto de personalização em massa e serviços de fundição.
<i>Integrated Set Parts Supply System in a Mixed-Model Assembly Line</i>	Suhartini Mohd Jainury; Rizauddin Ramli; Mohd Nizam Ab Rahman; Azhar Omar	2014	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha e sincronização automática de dados entre MES, ERP e e-kanban. Big Data e Análise de Dados – tratamento de dados WIP em tempo real. Computação em Nuvem – sistema e-kanban baseado em web.	- Redução do tempo de espera de 300 s → 0 s (supermercado). - Redução do tempo de espera de 60 s → 0 s (linha de montagem). - Eliminação de seis operadores no armazém (poupança ≈ RM3.600/mês). - Redução de 1.500 pés² de área de armazenamento (poupança ≈ RM3.000). - Poupança total de inventário ≈ RM 46.200/mês. - Fluxo JIT alcançado e fornecimento totalmente sincronizado.	- Integração complexa entre MES, ERP e fornecedores. - Adaptação cultural ao uso de sistemas e-kanban digitais. - Manutenção e atualização de dados em tempo real. - Falta de normalização na interface de dados. - Limitação do estudo à avaliação de apenas três estratégias.	O estudo evidencia que a integração entre MES, e-kanban e Set Parts Supply permite alcançar sincronização total no fornecimento de peças e eliminar tempos de espera. A solução digital reduz custos operacionais e aumenta a eficiência logística, melhorando a precisão da informação e o controlo JIT. Apesar de desafios na integração de sistemas e na otimização das estratégias, o modelo mostra ganhos expressivos de produtividade e constitui uma referência prática para sistemas MES aplicados a linhas de montagem de modelos mistos.
<i>Overall Equipment Effectiveness (OEE) Life Cycle at the Automotive Semi-Automatic Assembly Lines</i>	Péter Dobra; János Jösvai	2022	Caso Industrial	Sim	Big Data e Análise de Dados – recolha e análise de séries temporais de OEE via MES. Internet das Coisas (IoT) – comunicação contínua entre estações automáticas e o MES.	- OEE estável e elevado independentemente do volume de produção. - Custos de manutenção, mão de obra e qualidade em decréscimo contínuo. - Dados fiáveis permitiram definir o conceito de ciclo de vida do OEE. - Identificação de três fases distintas com impacto operacional mensurável.	- Variabilidade inerente às linhas semi-automáticas. - Falta de padronização universal de indicadores. - Necessidade de longa duração de recolha de dados para conclusões robustas. - Dificuldade em replicar o modelo em contextos de curta série.	O estudo introduz o conceito de ciclo de vida do OEE e comprova que a monitorização sustentada via MES permite prever custos e otimizar a eficiência em linhas semi-automáticas automóveis. As três fases identificadas - ramp-up, produtiva e run-out - apresentam padrões previsíveis de desempenho e custo, evidenciando a utilidade do MES na gestão do ciclo produtivo. A estabilidade dos valores de OEE, independentemente do volume, confirma a maturidade operacional e a importância do controlo digital contínuo como suporte às práticas de manutenção e qualidade.

<i>Digital Transformation for Improved Energy and Product Efficiency in Tire Production: A Case Study</i>	Abdullah Temel; Murat Ayaz; Volkan Aygul	2023	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha de dados em tempo real de sensores e PLC. Big Data e Análise de Dados - otimização dinâmica das receitas e tempos de mistura. Computação em Nuvem - servidores SAP S4/HANA e MII com estrutura DEV-QA-PROD. Cibersegurança - ligação segura via VPN e firewalls entre redes.	- Redução de parâmetros totais em 79%. - Aumento de eficiência em 7% e de eficácia em 15%. - Eficiência global dos equipamentos (OEE) +33%. - Recuperação de 2.4 MWh/dia de energia. - Diminuição de 5% em produtos defeituosos (355 465 kg/ano). - Poupança anual de 39 500 USD. - ROI de 67% no primeiro ano e 316% no terceiro.	- Complexidade da integração MES-ERP-SCADA. - Dependência de conectividade contínua e segurança em nuvem. - Resistência organizacional à digitalização. - Requisitos elevados de manutenção e atualização.P33.	A transformação digital baseada no MES e ERP demonstrou ganhos expressivos de produtividade, eficiência energética e sustentabilidade no fabrico de pneus. A integração vertical ISA-95, associada a tecnologias IoT, Big Data e computação em nuvem, reduziu significativamente desperdícios e custos. O sistema tornou-se mais rastreável e previsível, permitindo uma melhoria de 33% na eficiência global e um ROI rápido. A abordagem digitalização industrial, reforçando o papel do MES como elemento central na Indústria 4.0.
					Big Data e Análise de Dados - extração e tratamento de dados históricos do MES. Simulação e Gémeos Digitais - modelo virtual DES com ligação ao sistema real. Internet das Coisas (IoT) - recolha automática de dados via sensores e PLC. Cibersegurança - controlo de acesso e integridade de dados empresariais.	- Estrutura de integração DT-MES validada conceitualmente. - Dados do MES utilizados para previsão e simulação. - Apoio à decisão em replaneamento de ordens. - Sincronização entre planeamento, execução e monitorização. - Base para futura implementação industrial do gémeo digital.	- Qualidade e fiabilidade dos dados MES ainda condicionadas por inserções manuais. - Volume e heterogeneidade de dados exigem data cleaning intensivo. - Necessidade de padronizar métodos de recolha e sincronização. - Desafio em escalar o modelo para ambientes industriais complexos.	O artigo propõe um enquadramento sólido para integrar o gémeo digital com o MES e outros sistemas empresariais, mostrando o seu potencial para apoiar o planeamento e a decisão operacional em contextos discretos. Destaca-se a importância crítica da qualidade e sincronização dos dados, bem como da integração PLM-ERP-MES-DT para uma gestão digital coerente. Embora ainda conceptual, o modelo constitui uma base prática para evoluir para implementações reais de gémeos digitais orientados a dados, reforçando a ligação entre monitorização, previsão e execução produtiva.
					Internet das Coisas (IoT) - sensores e câmaras conectadas para recolha de dados em tempo real. Machine Learning - deteção automática de atividades e anomalias. Inteligência Artificial (IA) - análise preditiva de desempenho e apoio à decisão. Big Data e Análise de Dados - tratamento e integração massiva de dados visuais e sensoriais.	- Melhoria da eficiência produtiva e da visibilidade de processo. - Redução de 30% do tempo improdutivo em tarefas de soldadura. - Aumento do KPI de eficácia de 60% para mais de 90%. - Implementação de controlo automático baseado em IA. - Dados de alta resolução (0,25 s) alimentam o MES e o planeamento.	- Preocupações éticas e legais na recolha de vídeo de trabalhadores. - Limitação da validação a um número reduzido de processos industriais. - Dependência de algoritmos de ML e de infraestrutura de dados robusta. - Necessidade de integração segura entre sensores, WPM e MES.	O estudo mostra que o método WPM permite digitalizar a observação do trabalho e fornecer dados fiáveis ao MES, melhorando a eficiência e a rastreabilidade dos processos produtivos. A integração de vídeo, sensores e algoritmos de IA reduz as limitações das medições tradicionais, viabilizando o controlo automático e a análise contínua de desempenho. O WPM constitui uma abordagem inovadora para a Indústria 4.0, com potencial de expansão para novos contextos e melhoria do suporte à decisão através de dados de elevada granularidade e precisão.

Towards the Implementation and Integration of a Digital Twin in a Discrete Manufacturing Context

Workplace Performance Measurement: Digitalization of Work Observation and Analysis

<i>A Holonic Approach for Manufacturing Execution System Design: An Industrial Application</i>	Pascal Blanc; Isabel Demongodin; Pierre Castagna	2008	Caso Industrial	Sim	- Controle descentralizado validado em ambiente industrial real (AGP). - Sincronização de ordens e recursos com elevada robustez. - Redução do tempo de resposta a eventos e falhas. - Menor necessidade de intervenção humana na programação. - Melhoria do controlo de qualidade e rastreabilidade. - Integração funcional entre ERP e MES via estrutura holónica.	- Dificuldade de otimização global devido à natureza emergente do sistema. - Complexidade na calibração e coordenação entre holons. - Requer competências em sistemas multi-agente e modelação distribuída. - Necessidade de ferramentas de simulação e validação contínua.	O estudo mostra que uma arquitetura holónica baseada no modelo PROSA é eficaz para conceber um MES descentralizado, reativo e escalável. A aplicação industrial confirma que a estrutura proposta melhora a flexibilidade e a capacidade de resposta do sistema, reduzindo falhas e tempos de espera. A integração entre ERP e MES, suportada por agentes cooperativos, assegura um controlo contínuo e adaptável. Persistem desafios na afinação e na previsão do comportamento emergente, mas o método constitui uma base sólida para MES evolutivos e interoperáveis em contextos de produção discreta.
					Sistemas Multi-Agente (Inteligência Artificial Distribuída) - coordenação holónica descentralizada via JADE/FIPA. Simulação e Gémeos Digitais - uso de simulação discreta (Arena) como emulador do sistema físico. Integração Ciberfísica - ligação direta entre ERP, MES e dispositivos físicos através de agentes e interfaces TCP/IP.	- Taxa de utilização de materiais ≈ 93,52%. - Redução da taxa de desperdício para ≈ 2,58%. - Melhoria da eficiência global e da coordenação inter-sistemas. - Decisão operacional suportada por dados em tempo real.	A integração coordenada de APS, MES e VMS mostra ganhos claros na eficiência e na rastreabilidade em contexto make-to-order de mobiliário personalizado. O MES destaca-se como plataforma central de execução e de dados, reduzindo desperdício e melhorando o controlo operacional. A arquitetura modular facilita escalabilidade e adaptação a fluxos variáveis, embora persistam desafios na qualidade de dados, na automação de processos manuais e na orquestração entre sistemas. O estudo fornece um referencial prático para evoluir para operações mais digitais e orientadas por dados.
					Internet das Coisas (IoT) - recolha automática de estado/execução no chão de fábrica. Big Data e Análise de Dados - indicadores operacionais para otimização. Simulação e Gémeos Digitais - apoio ao planeamento e avaliação de cenários.	- Previsão precisa do OEE com erro absoluto médio de 0,0409. - Identificação de padrões de disponibilidade, desempenho e qualidade. - Redução de tempos de paragem não planeados e de refugos. - Apoio ao planeamento e equilíbrio das linhas de montagem.	O estudo mostra que a integração entre MES, ERP e técnicas de Machine Learning permite construir catálogos de padrões (APC) que melhoram a previsão e o controlo do OEE em linhas de montagem autónoma. A abordagem promove uma maior compreensão dos fatores que afetam a disponibilidade, o desempenho e a qualidade, oferecendo suporte robusto ao planeamento e à otimização de capacidade. Os resultados evidenciam o potencial da análise de dados industriais em larga escala para a tomada de decisão preditiva e o desenvolvimento de processos produtivos mais equilibrados e eficientes.
<i>Overall Equipment Effectiveness-related Assembly Pattern Catalogue based on Machine Learning</i>	Péter Dobra, János Jósvai	2023	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha de dados em tempo real a partir de linhas de montagem inteligentes. Big Data e Análise de Dados - exploração de grandes volumes de dados MES e ERP. Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning - criação de modelos de previsão baseados em padrões.	- Variabilidade estocástica dos processos de montagem. - Dificuldade em prever falhas técnicas com precisão total. - Necessidade de contínua validação e correção dos modelos preditivos.	A integração coordenada de APS, MES e VMS mostra ganhos claros na eficiência e na rastreabilidade em contexto make-to-order de mobiliário personalizado. O MES destaca-se como plataforma central de execução e de dados, reduzindo desperdício e melhorando o controlo operacional. A arquitetura modular facilita escalabilidade e adaptação a fluxos variáveis, embora persistam desafios na qualidade de dados, na automação de processos manuais e na orquestração entre sistemas. O estudo fornece um referencial prático para evoluir para operações mais digitais e orientadas por dados.

Overall Equipment Effectiveness Prediction with Multiple Linear Regression for Semi-automatic Automotive Assembly Lines	Péter Dobra; János Jósvari	2023	Caso Industrial	Sim	Big Data e Análise de Dados - tratamento de grandes volumes de dados MES e SQL. Inteligência Artificial (IA) / Machine Learning - aplicação de regressão linear múltipla supervisionada. Internet das Coisas (IoT) - recolha automática de dados de linha em tempo real via MES.	- Modelo combinado atingiu R² ajustado = 0,8422 (maior precisão). - Método fix rolling horizon obteve MAPE = 4,77%. - Previsões suportam decisões de investimento e aceleração de novas encomendas. - Identificação de padrões de paragem e desempenho.	- Variabilidade elevada entre turnos e condições operacionais. - Necessidade de calibração contínua dos modelos MLR. - Falta de padronização de variáveis entre bases de dados. - Dependência de histórico de dados fiável.	O estudo comprova que a aplicação de regressão linear múltipla a dados provenientes do MES permite prever o OEE com elevada precisão e apoiar decisões de planeamento e investimento. Entre os quatro métodos testados, o modelo combinado apresentou melhor desempenho global, confirmando a importância da integração entre MES, ERP e bases de dados industriais. A abordagem evidencia o potencial das técnicas de Machine Learning para transformar indicadores operacionais em ferramentas de previsão robustas, consolidando a Indústria 4.0 como suporte analítico ao fabrico inteligente.
					Internet das Coisas (IoT) - sensores/atuadores, IoT Agent e broker com modelo de dados genérico. Big Data e Análise de Dados - processamento de eventos e análise de atrasos; exploração de dados históricos. Computação em Nuvem - visualização e dashboards (ex.: Power BI) e integração com plataformas abertas (p.ex.: FIWARE).	- Monitorização consistente da linha e do comportamento de atrasos. - Automação do controlo de tempos de execução por ordem/operação. - Melhoría da qualidade dos dados e redução de erros humanos. - Respostas mais rápidas e informadas no controlo produtivo. - Arquitetura reutilizável a outros setores industriais.	- Escalabilidade: carga do Data Provider sobre a BD do MES. - Integração com sistemas legados e heterogeneidade de dados. - Necessidade de módulos adicionais (qualidade, alarmística avançada) e futura incorporação de IA.	A plataforma IoT propostia integra dados do MES, sensores e mecanismos de análise, automatizando a monitorização de ordens e operações e a delegação de atrasos. A validação mostra comportamento conforme o esperado, com ganhos de qualidade e tempestividade informacional e com visualização operacional dedicada. Persistem desafios de escalabilidade na interação com o MES e de integração com legados, mas o desenho modular e o modelo de dados genérico facilitam a extensão a outros domínios e a evolução com módulos de qualidade, alarmística e técnicas de IA para otimização.
Data-driven machine criticality assessment – maintenance decision support for increased productivity	Maheshwaran Gopalakrishnan; Mukund Subramanian; Anders Skoogh	2020	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha automática de estados/tempos via MES. Big Data e Análise de Dados - análise data-driven de grande volume de eventos. Simulação e Gémeos Digitais - simulação de eventos discretos para validação do enquadramento.	- Aumento do <i>throughput</i> nos quatro casos (simulação). - Execução de PM em MOW reduz perdas por paragem. - Priorização de RM melhora disponibilidade efetiva. - Alinhamento produção-manutenção com base em dados. - Identificação de discrepâncias MES vs. CMMS nas paragens.	- Qualidade de dados (sub-registo no CMMS). - Paragens não categorizadas no MES). - Falta de automatização na recolha de dados de manutenção. - Integração de múltiplas fontes (MES/CMMS) e sincronização temporal. - Amostras e processos heterogêneos entre fábricas.	A integração de dados de MES e CMMS permite avaliar criticidade de máquinas com enfoque em produtividade e orientar decisões de PM/RM de forma sistémica. A validação por simulação evidencia ganhos consistentes de <i>throughput</i>, sobretudo quando a PM é deslocada para MOW e a RM é priorizada no gargalo. Persistem desafios de qualidade e integração de dados e de capacitação analítica das equipas. O enquadramento proposto fornece um caminho aplicável para manutenção data-driven em linhas automóveis discretas.

Leveraging Industry 4.0 for Sustainable Manufacturing: A Quantitative Analysis Using FL-RST	Qingwen Li, Wafan Tang e Zhaobin Li	2024	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - sensores e conectividade industrial. Inteligência Artificial (IA) - análise preditiva e apoio à decisão. Manufatura Aditiva (Impressão 3D) - redução de desperdício e emissões. Computação em Nuvem - gestão e integração de dados. Realidade Aumentada (RA) / Realidade Mista (MR) - treino e segurança de operadores.	- Redução média de 25 % nos resíduos. - Diminuição de 18 % no consumo energético. - Aumento de 20 % na eficiência de recursos. - Crescimento médio de 140 % na receita empresarial. - Melhoria da segurança e formação em 40 %. - Redução de 41,7 % de acidentes laborais.	- Complexidade de integração com outras tecnologias da Indústria 4.0. - Custos de implementação e manutenção. - Falta de profissionais qualificados. - Necessidade de políticas de apoio à sustentabilidade.	O estudo evidencia que a integração das tecnologias MES, IIoT e Manufatura Aditiva potencia a sustentabilidade industrial, ao combinar ganhos económicos, ambientais e sociais. A metodologia FL-RST mostra eficácia na quantificação desses impactos e na identificação de sinergias tecnológicas. As empresas com maior adoção de soluções digitais alcançam melhor desempenho global, com redução significativa de emissões, custos e acidentes. A investigação reforça a importância de políticas industriais que incentivem a digitalização sustentável e a formação contínua no contexto da Indústria 4.0.
					Internet das Coisas (IoT) - recolha e troca de dados de sensores e sistemas MES através da IIP. Inteligência Artificial (IA) - aplicação de redes neurais em grão (GNN) para previsão e decisão descentralizada. Big Data e Análise de Dados - integração e tratamento massivo de dados MES/ERP em tempo real. Computação em Nuvem - suporte à plataforma IIP e aos serviços distribuídos. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - ligação entre entidades físicas (fábricas, linhas, equipamentos) e modelos digitais cooperativos.	- Validação em cadeia real de ar condicionado. - Reconfiguração sincronizada com melhoria de 22–35 % no tempo de recuperação pós-ruptura. - Aumento de 18 % na utilização média dos recursos. - Redução de 20 % nas perdas logísticas. - Reforço da coordenação entre plantas e fornecedores.	- Integração heterogênea entre sistemas ERP/MES legados. - Escalabilidade limitada em redes de larga dimensão. - Elevado custo de computação e comunicação distribuída. - Necessidade de padronização dos modelos IIP e GNN.	O estudo mostra que uma plataforma industrial IIP, combinada com modelos GNN e coordenação Lagrangiana, permite reconfigurar de forma sincronizada e descentralizada cadeias de montagem complexas. O MES, integrado como camada operativa inteligente, assegura a recolha e a coerência dos dados de execução, potenciando a flexibilidade e a resiliência global da rede. A validação industrial confirma ganhos significativos de sincronização e desempenho, embora persistam desafios de escalabilidade, interoperabilidade e complexidade de implementação.
Improving the OEE and UPH Data Quality by Automated Data Collection for the Semiconductor Assembly Industry	Tai-Yue Wang, Hsiao-Chun Pan	2011	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - comunicação entre MES e equipamentos via HMS/SECS. Big Data e Análise de Dados - base de dados de UPH e OEE com análise quantitativa e qualitativa. Cibersegurança - verificação e validação de mensagens entre sistemas IT/OT.	- Perdas OEE desconhecidas reduzidas de 6,2% para 0%. - Dados OEE e UPH recolhidos automaticamente em tempo real. - Melhoria substancial da qualidade dos dados (relevância, precisão, tempestividade, acessibilidade, interpretabilidade e transparência). - Apoio fiável a decisões de custo e rentabilidade. - Possibilidade de implementação de Activity Based Costing (ABC) com dados fiáveis.	- Resistência inicial dos operadores à mudança. - Definição e manutenção de códigos de estado segundo SEMI E10. - Dependência da estabilidade de comunicação e integridade de rede. - Necessidade de calibração e validação contínua do ADC.	O sistema ADC integrado com o MES demonstrou eliminar praticamente todas as perdas OEE não identificadas e melhorar a precisão dos dados de produção. A recolha automática de tempos e taxas de <i>throughput</i> aumentou a fiabilidade das decisões de custo e eficiência, reduzindo erros associados a medições manuais. O Caso Industrial confirma que a integração MES-equipamento com protocolos SEMI é uma via eficaz para digitalização e melhoria contínua na indústria de semicondutores, reforçando a rastreabilidade, a consistência e o desempenho operacional alinhado com a Indústria 4.0.

<i>Machine Learning-Integrated Digital Twins for Process Optimization in Industry 5.0</i>	Carlos Jefferson de Melo Santos, Ava Santana Barbosa, Angelo Márcio Oliveira Sant'Anna	2025	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha e comunicação de dados de sensores industriais. Big Data e Análise de Dados – processamento e gestão de grandes volumes de informação operacional. Inteligência Artificial (IA) – aprendizagem supervisionada e não supervisionada aplicada à previsão de desempenho. Machine Learning – integração com ODE para otimização e previsão contínua. Simulação e Gémeos Digitais – modelo híbrido DT-ML para replicação do processo produtivo. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração SCADA–MES–ERP para sincronização e controlo digital.	- Precisão preditiva elevada (R² até 0.9998). - Redução significativa dos tempos de carga e desvios. - Otimização do consumo de matérias-primas. - Aumento da sustentabilidade e eficiência energética. - Melhoria da rastreabilidade e apoio à decisão humana.	A integração de ODEs e ML num Gémeo Digital industrial, sustentada por dados provenientes do MES, potencia a transição da Indústria 4.0 para a 5.0, promovendo eficiência, sustentabilidade e centralidade humana. O sistema híbrido demonstrou elevada precisão e robustez, reduzindo desperdícios e aumentando a previsibilidade operacional. A investigação confirma o papel central do MES como eixo de integração ciberfísica e suporte à decisão digital, ainda que persistam desafios ligados à qualidade de dados e à interoperabilidade entre sistemas.
<i>Radio Frequency Identification-Enabled Real-Time Manufacturing Execution System: A Case Study in an Automotive Part Manufacturer</i>	Qingyun Dai; Runyang Zhong; George Q. Huang; Ting Qu, T. Zhang; T. Y. Luo	2012	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – via RFID (tags LF, leitores por máquina, RS-485) para recolha automática e rastreabilidade. Big Data e Análise de Dados – consolidação de eventos, cálculo de WIP/estados e exploração de indicadores para decisão.	- Eficiência de produção +12%. - WIP –34%. - Qualidade +40%. - Papelada –88%. - Informação atempada +96%. - +2.2 Milhões de peças/ano sem novo investimento. - Poupança >1 milhão RMB em CAPEX e desperdícios.	O caso mostra que um RT-MES suportado por RFID permite visibilidade e controlo eficazes numa PME automóvel, com ganhos quantitativos em eficiência, qualidade e inventário. A arquitetura distribuída de captura, o middleware e a sequênciação por pools sustentam decisões operacionais robustas e integração futura com ERP. Persistem desafios de padronização, formação e engenharia de comunicação, porém o quadro metodológico e os resultados obtidos evidenciam replicabilidade e valor para fornecedores automóveis com elevada variedade e volatilidade de encomendas.
<i>Improved Performance Monitoring and Maintenance Processes using new data systems, sensors, and digital modelling in Cold Mill Roll Shop at Tata Steel Ijmuiden</i>	J. Bernard; H. Bolt; M. Heijne; M. Kamper; J. Teerenstra; M. Geers; M. Bonis; T. Mentink	2023	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – aquisição via Iba-PDA, OPC-UA, MindConnect e integração PLC Beckhoff/Siemens. Computação em Nuvem – plataforma Siemens Mindsphere para OEE e armazenamento/análítica. Big Data e Análise de Dados – séries históricas de OEE e análise de causas de perdas. Simulação e Gémeos Digitais – modelo digital do Roll Shop; delineação Digital Model/Shadow/Twin. Cibersegurança – salvaguarda de dados em cloud e desenho com requisitos de segurança. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – enquadramento CyberMan4.0 e integração IT/OT.	- Conectividade OT →Mindsphere estabelecida e dashboard OEE implementado para a refinadora 449. -Automatização da atribuição de perdas e eliminação de medições manuais por cronómetro. - Janela de predição de manutenção de 3 a 9 meses com SPM. - Redução esperada de risco FMEA em 35–50%. - Modelo digital para identificar estrangulamentos e suportar planeamento.	A modernização progressiva do ecossistema IT/OT no Roll Shop permitiu instrumentar OEE em nuvem, introduzir condition monitoring com sensores Shock Pulse e construir um modelo digital para análise de constrangimentos. Os resultados apontam para ganhos de visibilidade, redução de risco e capacidade de planeamento mais informada. Persistem desafios de integração e gestão de dados de alta frequência, mas a abordagem integrada alinha-se com o modelo de Manutenção 4.0 e sustenta a evolução para <i>Digital Shadow</i> e, futuramente, para <i>Digital Twin</i> com realimentação operacional.

<i>A Risk Management Framework for Industry 4.0 Environment</i>	2023	Caso Industrial	Sim	László Péter Pusztai, Lajos Nagy, István Budai	Internet das Coisas (IoT) - via sensores e sistemas de recolha automática de dados. Big Data e Análise de Dados - para tratamento estatístico e simulação Monte Carlo. Simulação e Gémeos Digitais - para modelação estocástica e previsão de desempenho. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - interligação entre máquinas, dados e controlo MES.	- Melhoria da fiabilidade e previsibilidade da produção. - Planeamento mais robusto face a incertezas e riscos. - Redução de custos até 2,3% na programação ótima. - Aumento da utilização de capacidade até 97%. - Maior rastreabilidade e transparência no processo.	- Qualidade e granularidade dos dados recolhidos. - Dificuldade de modelação de riscos em processos complexos. - Integração entre múltiplas oficinas e bases de dados. - Limitações de software e necessidade de atualização contínua.	O estudo mostra que a integração de dados MES em métodos quantitativos de gestão de risco permite melhorar significativamente a programação da produção e a eficiência global. A abordagem estocástica, baseada em indicadores de fiabilidade e simulação, viabiliza decisões mais realistas e fundamentadas. O modelo proposto é aplicável a ambientes multi-oficina e destaca o papel do MES como elemento central da Indústria 4.0 na orquestração de processos produtivos inteligentes.
					Internet das Coisas (IoT) - ligação de sensores e equipamentos industriais via OPC-UA e MODBUS. Big Data e Análise de Dados - recolha e tratamento massivo de dados produtivos. Inteligência Artificial (IA) - otimização preditiva e apoio à decisão. Simulação e Gémeos Digitais - modelação digital dos processos de produção e manutenção. Robôs Autónomos - sistemas automatizados para logística e inspeção. Realidade Aumentada (RA) - formação industrial e apoio técnico remoto. Cibersegurança - proteção de dados industriais e sistemas corporativos. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - integração total entre equipamentos, sensores e controlo MES.	- Aumento de 91% na produção de ferro-silício manganês (Taraz Plant). - Crescimento de 2,1% na produção de aço (ArcelorMittal Temitau). - Aumento de 19% na produção de cobre catódico (Kazakhstan Metallurgical). - Redução do ciclo de produção e dos custos energéticos. - Melhoria global da rastreabilidade e da qualidade dos produtos.	- Escassez de especialistas em automação e digitalização. - Custos elevados de digitalização e manutenção. - Falta de normas unificadas e de políticas de interoperabilidade. - Dificuldade de adaptação de equipamentos antigos à Indústria 4.0.	O estudo evidencia que a adoção do MES é fundamental para a transformação digital da indústria metalúrgica. A integração dos sistemas de controlo, planeamento e execução melhora a eficiência produtiva, a rastreabilidade e a sustentabilidade. As empresas que implementaram o MES registaram ganhos significativos de produtividade e qualidade. Contudo, persistem desafios relacionados com a escassez de competências, os custos de implementação e a modernização de infraestruturas, apontando para a necessidade de políticas de apoio à digitalização industrial.
<i>Research on Quality Control Application of Whole Process Intelligent Manufacturing in Steel Industry 4.0 Based on Big Data Analysis</i>	2022	Caso Industrial	Sim	Feng Zhao; Chen Yin; Xiaoxiao Huo; Yingying Xu	Internet das Coisas (IoT) - via sensores PLC e recolha contínua de dados. Big Data e Análise de Dados - processamento de mais de 100 000 registos diários. Inteligência Artificial (IA) - aplicada à classificação e predição. Machine Learning - (árvore ZC4.5, MSPM, Granger). Simulação e Gémeos Digitais - modelo 1:1 da linha de produção. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - integração PLC-MES-ERP.	- Precisão de deteção de falhas aumentada de 3 % (MICA) para 18,5 % (MSPM). - Taxa de falsos positivos reduzida para 0 %. - Melhoria da qualidade superficial das chapas. - Diagnóstico rápido de variáveis causais (temperatura, velocidade e altura do loop).	- Integração complexa de grandes volumes de dados industriais. - Necessidade de harmonização entre múltiplos sistemas (ERP, MES, SCADA). - Escassez de recursos computacionais para análise em tempo real. - Falta de padronização nos modelos de dados e nas interfaces.	O estudo mostra que a integração de algoritmos ML no MES permite evoluir de um controlo empírico para um sistema de qualidade multivariado e automatizado, aplicável à produção siderúrgica. O modelo ZC4.5-MSPM-Granger reduz erros, melhora a fiabilidade e sustenta a transição para a Indústria 4.0. A abordagem é replicável a outras unidades de processamento contínuo e constitui uma base para gémeos digitais e controlo ciber-físico em ambientes de produção inteligente.

<i>A cloud-based manufacturing control system with data integration from multiple autonomous agents</i>	Silviu Răileanu, Florin Anton, Theodor Borangiu, Silvia Anton, Maximilian Nicolae	2018	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – dispositivos embebidos e sensores inteligentes. Computação em Nuvem – infraestrutura privada IaaS com VMware e MySQL cluster. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – agentes distribuídos integrando máquinas e produtos. Cibersegurança – PKI, SSL/TLS, VPN IP-Sec. Big Data e Análise de Dados – monitorização e processamento energético em tempo real.	- Comunicação em tempo real entre agentes e nuvem (latência média 1,24 s). - Elevada fiabilidade e recuperação automática de falhas (HA cluster). - Redução da perda de dados e estabilidade do planeamento. - Capacidade de reconfiguração automática e escalabilidade da infraestrutura. - Medição precisa do consumo energético (erro <3%).	- Complexidade de integração multi-agente. - Exigência de sincronização entre níveis de decisão (SS e dMES). - Dependência de rede fiável e largura de banda. - Custo computacional da reotimização contínua. - Gestão da segurança em comunicações industriais distribuídas.	O estudo confirma a eficácia de uma arquitetura MES em nuvem privada para controlo distribuído e sustentável de sistemas de produção. A abordagem mostra capacidade de operar em tempo real com dispositivos inteligentes, assegurando elevada disponibilidade, segurança e escalabilidade. A integração entre agentes, base de dados replicada e motor de optimização em nuvem permite reduzir falhas e melhorar o desempenho energético, embora a complexidade e os requisitos computacionais continuem a ser desafios relevantes.
					Internet das Coisas (IoT) – integração de dados de máquinas e sensores. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - ligação ERP–MES–SCADA. Big Data e Análise de Dados - avaliação de KPI e planeamento.	- 93% Dos participantes confirmaram aumento da competitividade. - Melhoria na qualidade e planeamento de produção. - Aumento da eficiência de manutenção. - Comunicação em tempo real entre ERP e chão de fábrica. - Melhoria na formação e envolvimento dos colaboradores.	- Integração técnica complexa entre sistemas heterogêneos. - Custos iniciais de desenvolvimento e implementação. - Resistência dos utilizadores à adoção. - Necessidade de aprendizagem contínua para sustentar os ganhos.	O estudo confirma que a integração entre MES e ERP potencia melhorias significativas na gestão industrial, promovendo controlo em tempo real, eficiência e competitividade. A validação em ambiente fabril automável evidenciou ganhos operacionais e estratégicos, embora os resultados dependam fortemente da integração técnica e da formação dos utilizadores. A pesquisa mostra que a integração MES-ERP constitui uma etapa essencial para a transição digital das empresas rumo à Indústria 4.0, especialmente quando acompanhada por processos de aprendizagem contínua e melhoria organizacional.
<i>Real-Time Data-Driven Average Active Period Method for Bottleneck Detection</i>	Mukund Subramanian, Anders Skoogh, Maheshwaran Gopalakrishnan, Atieh Hanna	2016	Caso Industrial	Sim	Big Data e Análise de Dados - processamento em tempo real de grandes volumes de dados de máquinas.	- Identificação precisa dos gargalos produtivos. - Redução do tempo de deteção de estrangulamentos. - Melhoria na planificação de manutenção preventiva. - Aumento da produtividade e da utilização das máquinas.	- Necessidade de limpeza e validação de dados históricos. - Limitações na disponibilidade de dados temporais consistentes. - Complexidade de integração em sistemas industriais heterogêneos.	O estudo mostra que a deteção de gargalos através de algoritmos baseados em dados MES é viável, precisa e aplicável em sistemas produtivos complexos. O método proposto elimina a dependência de modelos de simulação, tornando possível uma análise contínua e escalável. A abordagem reforça a importância dos dados em tempo real na gestão da produção e fornece uma base sólida para futuras aplicações de análise preditiva e manutenção inteligente no contexto da Indústria 4.0.
					Machine Learning – aprendizagem por reforço (Q-learning individual e multi-agente) aplicada a decisão de rotas e qualidade de serviço.	- Estabilidade do @MES e rejeição significativa de perturbações. - Capacidade de lidar com eventos imprevistos com sucesso. - Individual Q-learning converge mais rápido e seleciona ações ótimas após ~20 passos no estudo.	- Transferência da simulação para operação real (interoperabilidade ERP/MES/SCADA). - Qualidade de dados e sincronização temporal (sensores/PLC/DCS). - Ajuste de parâmetros de aprendizagem e desenho de recompensas.	O estudo mostra que um MES autônomo multi-agente com aprendizagem por reforço pode sustentar controlo distribuído em redes empresariais, com adaptação a custos e fiabilidade e programação emergente. As simulações em ambiente de produção de tintas evidenciam estabilidade e capacidade de resposta a falhas. A utilidade prática é promissora, embora a validação industrial abrangente e a integração tecnológica completa permaneçam como passos futuros.

<i>Development of Manufacturing Execution System with Production Modelling Approaches</i>	Yunqing Rao; Wei Zhou; Fei He	2010	Caso Industrial	Sim	Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - integração entre elementos físicos (máquinas, sensores) e objetos digitais via motor de workflow. Internet das Coisas (IoT) - através da recolha automática de dados de qualidade e identificação por código de barras e sensores. Simulação e Gémeos Digitais - via modelação gráfica DAG/XML para representar e testar processos produtivos.	- Validação com sucesso numa linha de motores automóveis na China. - Redução dos custos de implantação e do tempo de configuração. - Recolha e análise em tempo real de dados de produção e qualidade. - Flexibilidade para alterações de produto ou processo sem nova programação.	- Necessidade de padronização de interfaces de workflow industriais. - Integração limitada com ERP e APS comerciais. - Complexidade de gestão de dados em arquiteturas distribuídas. - Requisitos de formação elevados para engenheiros de implantação.	O estudo mostra que a tecnologia de workflow é uma solução eficaz para desenvolver MES configuráveis e reutilizáveis. A implementação industrial na linha de motores automóveis confirmou ganhos de flexibilidade e rastreabilidade, permitindo adaptar rapidamente processos e parâmetros de qualidade. O modelo baseado em DAG e XML oferece transparência e modularidade, embora dependa de ferramentas de integração e competências técnicas especializadas. O WFMES constitui um passo significativo para sistemas MES mais inteligentes e compatíveis com os princípios da Indústria 4.0.
<i>Achieving e-Manufacturing: Multihead Control and Web Technology for the Implementation of a Manufacturing Execution System</i>	Arturo Molina; Armando Ramirez Santaella	2006	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - via ligação web em tempo real entre ERP, MES e estações de trabalho digitais. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - interação entre monitores e servidores Linux com equipamentos de produção no chão-de-fábrica. Computação em Nuvem - referida implicitamente através do uso de arquitetura web-based e servidores distribuídos. Simulação e Gémeos Digitais - modelação digital da fábrica para sincronização de layout e fluxos de produção.	- Produtividade +67 %. - Precisão de inventário 40 % → 95 %. - Redução de atrasos (88 K → 5 K unidades). - Redução de refugo 8 % → 2 %. - Reconhecimento "Customer Centricity Award by GE".	- Manutenção e substituição continua de monitores e CPUs. - Necessidade de disciplinar os operadores no registo de dados. - Dependência da sincronização constante do ERP com as OMS. - Requerimentos de infraestrutura TI mínima para 24/7.	A solução baseada em tecnologia web e controlo multi-head comprovou ser uma alternativa robusta e de baixo custo para implementar e-Manufacturing em ambientes de alta variedade e mudança rápida. O MES web-based permitiu a sincronização plena entre ERP e chão-de-fábrica, melhorando drasticamente a produtividade, qualidade e precisão de inventário. Persistem desafios de manutenção e disciplina operacional, mas a arquitetura é transferível para outros setores como vidro e automotivo harnesses, e constitui um exemplo maduro de integração MES/Indústria 4.0.
<i>An XML Implementation Process Model for Enterprise Applications</i>	Yu-Hui Tao; Tzung-Pei Hong; Sheng-I Sun	2004	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) - interligação de sistemas ERP, MES e VIP via XML e redes web. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - integração entre dados digitais (XML/DTD) e entidades físicas de produção. Computação em Nuvem - arquitetura web e servidores distribuídos para intercâmbio de dados. Big Data e Análise de Dados - estruturação de dados EER/XML para interoperabilidade e tracing.	- Modelo XML aplicado com sucesso no MIRL-MES. - Integração completa ERP/MES/PDM. - Uniformização de classes e elementos de dados segundo RosettaNet. - Simplificação da manutenção de interfaces e redução de custos de integração.	- Necessidade de especialistas em DTD/XML. - Dificuldade de migração para XML Schema e novos padrões. - Manutenção de compatibilidade com dicionários RosettaNet em evolução. - Gestão da complexidade em integrações multi-aplicação.	O modelo XML-based proposto pelo MIRL mostra-se eficaz para a integração entre MES, ERP e PDM, fornecendo uma metodologia estruturada em sete etapas para troca de dados interna e B2B. A adoção de DTD compatíveis com RosettaNet garante padronização e interoperabilidade, reduzindo custos de middleware. O modelo é aplicável a outros contextos industriais, embora exija competências técnicas elevadas e gestão cuidadosa da evolução de padrões XML. Constitui um passo relevante na convergência entre MES e integração empresarial na Indústria 4.0.

Virtual Analyzers: Identification Approach	N. N. Bakhtadze	2004	Caso Industrial	Sim	Inteligência Artificial (IA) - via redes neurais e lógica difusa. Machine Learning – identificação e aprendizagem em tempo real. Big Data e Análise de Dados - utilização de dados correntes e históricos para modelos VA. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - interligação entre modelos virtuais e equipamentos reais de controlo.	- Geração automática de modelos preditivos e diagnósticos. - Melhoria da fiabilidade dos controlos e da qualidade de produto. - Redução de custos de instrumentação e manutenção. - Integração de IA em controlo e planeamento fabril. - Capacidade de aprendizagem e adaptação em tempo real.	- Falta de normalização no desenho de VAs. - Exigência de competências multidisciplinares (controlo + IA + estatística). - Resistência à adoção em sistemas industriais existentes. - Dificuldade em validar modelos híbridos em contexto fabril.	O conceito de “Virtual Analyzer” representa a base inteligente dos sistemas MES modernos, fundindo identificação, controlo adaptativo e inteligência artificial para otimizar decisões em tempo real. O artigo mostra que os VAs permitem substituir medições físicas por modelos preditivos fiáveis, reduzindo custos e melhorando a qualidade e a segurança dos processos. A sua aplicação em indústrias de processo contínuo evidencia o potencial das abordagens híbridas (fuzzy-logic, redes neurais, genetic algorithms) como passo decisivo na convergência entre controlo inteligente e MES orientado à Indústria 4.0.
Integration of MES and ERP in supply chains: Effect assessment in the case of the automotive industry	Simon Oman; Robert Leskovar; Bojan Rosi; Alenka Baggia	2017	Caso Industrial	Não explicitamente	(foco principal em integração ERP–MES e normalização ISA-95/Idoc)	- Atraso de troca de dados reduzido 24 h → 8 h. - Melhoria acima do esperado em pontualidade de entrega e cido de atendimento. - Redução de erros e duplicações nas entradas. - Benefícios significativos em velocidade, custos e activos (VRM). - Tomada de decisão em tempo real viabilizada pela integração.	- Limitações de desenvolvimento no NAV (falta de bibliotecas). - Heterogeneidade de sistemas. - Impacto limitado por tecnologia de produção envelhecida/alta mente utilizada. - Erros humanos no processo de encomenda. - Necessidade de normalização e expansão de avaliação à escala da cadeia.	O estudo mostra que a integração ERP–MES com IDoc/RFC reduz atraso de dados e melhora pontualidade e atendimento em cadeia automóvel. Benefícios VRM confirmam ganhos em velocidade, custos e ativos. Limitações: desenvolvimento no NAV, erros humanos e tecnologia produtiva envelhecida. Futuro: maior automatização, formação e avaliação multielelos.
Integration of Information for Manufacturing Shop Control	Zdravko Tešić; Vojin Mitrović; Ilija Čosić; Danijela Lalić	2010	Caso Industrial	Parcialmente	Internet das Coisas (IoT) – integração e comunicação entre máquinas NC, painéis de operação e servidor central via Ethernet e RS-232. Computação em Nuvem (incipiente) - consolidação de dados de produção em base de dados central acessível em rede.	- Comunicação bidireccional entre controlo de máquinas e MES. - Integração de ordens de fabrico, estados de máquina e dados de produção. - Redução de perdas de informação e tempos de ciclo. - Melhoria da rastreabilidade e controlo de qualidade. - Suporte à decisão em planeamento e escalonamento.	- Integração de equipamentos NC de gerações distintas. - Limitações de protocolos industriais (RS-232, Ethernet). - Falta de interoperabilidade total entre sistemas ERP e SCADA. - Necessidade de evolução para sistemas abertos e auto-organizáveis.	O estudo mostra a viabilidade de integrar informação entre os níveis de gestão, planeamento e execução, através de um módulo MES dedicado. A arquitetura implementada na indústria de rolamentos evidencia ganhos em rastreabilidade, sincronização e acesso em tempo real aos dados de produção. A integração vertical entre ERP, MES e controlo de máquinas constitui um passo essencial para a digitalização fabril. Contudo, persistem desafios na interoperabilidade e na adoção de padrões abertos, apontando para a necessidade de evolução futura dos MES em direção a sistemas auto-organizáveis e compatíveis com a Indústria 4.0.

<i>Research on Evaluation System and Method of MES System for Intelligent Manufacturing</i>	Muhan Li, Yusheng Jiang, Ni Liang	2024	Caso Industrial	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha de dados em tempo real dos equipamentos, tratamento e modelação de indicadores de desempenho. Big Data e Análise de Dados – Inteligência Artificial (IA) – redes neurais BP e algoritmos genéticos. Machine Learning – aprendizagem supervisionada para classificação de níveis industriais. Simulação e Gémeos Digitais – validação futura prevista via gémeos digitais. Computação em Nuvem – implementação e gestão em servidor remoto.	- Precisão do modelo superior a 98%. - Erro médio de treino entre $\pm 0,00755$. - Correlação $R > 0,99$ entre valores reais e previstos. - Classificação da empresa Z entre Indústria 3.0 e 3.5. - Melhoria da avaliação da maturidade digital industrial.	- Limitações no tamanho das amostras reais. - Necessidade de calibração contínua do modelo GA-BP. - Dependência de qualidade e completude dos dados industriais. - Avaliação ainda estática (sem atualização em tempo real).	O estudo propõe um sistema quantitativo de avaliação da maturidade dos sistemas MES na manufatura inteligente, combinando GA-BP e SeqGAN para reforçar a precisão e a generalização. A validação em empresa real demonstrou uma correlação superior a 0,99 entre previsão e observação, classificando o sistema entre Indústria 3.0 e 3.5. O modelo mostra-se robusto e fiável para diagnóstico da maturidade digital, embora dependa de dados estáticos. Perspetiva-se a sua extensão com gémeos digitais e recolha em tempo real para avaliação dinâmica.
					Internet das Coisas (IoT) – via OPC UA e MQTT para ligação de máquinas e troca de dados em tempo real. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração entre ERP, MES e automação fabril. Computação em Nuvem – utilização de Azure e ThingWorx para gestão e análise distribuída. Big Data e Análise de Dados – suporte a rastreabilidade e transparência da cadeia. Simulação e Gémeos Digitais – modelos virtuais sincronizados com dados reais do MES.	- Aumento da rastreabilidade ao nível de materiais e componentes. - Partilha de informação em tempo real entre unidades. - Redução dos tempos de e mudança (<i>setup</i>). - Coordenação mais eficiente da rede de fornecimento. - Melhoria da análise em edge e da tomada de decisão autónoma.	- Integração de máquinas legadas com novos sistemas. - Ausência de interfaces padronizados em equipamentos antigos. - Escassez de casos holísticos sobre implementação IT/OT. - Dependência de normas abertas e colaboração entre departamentos.	O estudo evidencia que a implementação eficaz de MES/MOM conectados ao IIoT é essencial para alcançar cadeias de abastecimento da Indústria 4.0 reconfiguráveis e resilientes. A interoperabilidade baseada em ISA-95, APIs abertas e protocolos normalizados é condição crítica para a integração fim-à-fim. A utilização de análise em edge e gémeos digitais reforça a visibilidade operacional e permite decisões autónomas, embora a integração de equipamentos legados permaneça uma barreira significativa.
					Internet das Coisas (IoT) – recolha de dados através de sensores e módulos Edge. Inteligência Artificial (IA) – análise e otimização dos processos de fabrico. Machine Learning – aprendizagem híbrida para deteção de anomalias e melhoria contínua. Computação em Nuvem – gestão de dados e orquestração de microserviços. Cibersegurança – aplicação do conceito de Chain of Trust e certificação digital. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração de ECM, SSI e MES em ambiente industrial.	- Aumenta a rastreabilidade e a segurança da produção. - Melhora a qualidade e fiabilidade dos produtos eletrónicos. - Reduz riscos de falsificação e vulnerabilidades. - Potencia a aprendizagem contínua e a otimização baseada em dados.	- Necessidade de padronização de dados entre sistemas distribuídos. - Elevada complexidade de integração IoT–MES–AI. - Garantia de confiança e certificação entre múltiplos parceiros. - Gestão de dados em tempo real com requisitos de segurança críticos.	O estudo mostra a viabilidade de uma arquitetura de fabrico confiável baseada em MES, IoT e IA, capaz de integrar ambientes de produção distribuídos com elevados níveis de segurança e rastreabilidade. A abordagem "Chain of Trust" reforça a integridade e a confiança na produção microeletrónica, ao mesmo tempo que potencia a análise inteligente e a otimização dos processos. Esta combinação posiciona o MES como elemento estruturante na transição para fábricas inteligentes e distribuídas sob os princípios da Indústria 4.0.

<i>Lean Manufacturing and Industry 4.0: Unveiling Trends, Applications, and Global Impacts in Manufacturing Through Comprehensive Literature Review</i>	Aida Azizah Nor Aziana; Rusabiah Che Mamat; Dzullijah Ibrahim; Falan Abu	2025	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha automática e monitorização em tempo real. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – monitorização/controlo com feedback para OEE. Inteligência Artificial (IA) – avaliação/otimização associada a OEE. Simulação e Gémeos Digitais – modelação e planeamento. Computação em Nuvem – suporte a aplicações Lean/OEE. Big Data e Análise de Dados – exploração de grandes volumes para decisão.	- MES—Process Mapping é combinação frequente. - OEE-14.0 com ganhos recorrentes. - Melhoria de eficiência, sincronização e visibilidade. - Suporte à decisão com dados em tempo real.	A síntese evidencia que a integração Lean-14.0, com o MES como peça central, proporciona ganhos mensuráveis em eficiência e decisão. Destacam-se as combinações OEE-IoT e MES-Process Mapping. Contudo, custos, interoperabilidade e qualificação limitam a adoção, sobretudo em PME. O estudo recomenda abordagens faseadas, formação e ampliação do escopo de fontes para reforçar a robustez da evidência.
					Internet das Coisas (IoT) – recolha e publicação de dados via OPC UA/Node-RED. Computação em Nuvem – backend de dados (Firebase) para DT e aplicações. Simulação e Gémeos Digitais – modelo digital sincronizado com a linha física. Realidade Aumentada (RA) – interface para supervisão e atuação. Robôs Autónomos – robô móvel com navegação e evasão de obstáculos.	- 14,2 % No tempo médio de execução após falhas (~ 40,2 s). - 21,1 % De tempo médio nas rotas com evasão de obstáculos. - Interoperabilidade validada entre plataformas e subsistemas. - Melhoria da exatidão/eficiência via simulação de alta fidelidade + ARVR.	O estudo mostra que um MES com gémeo digital imersivo (ISO 23247) melhora a eficiência operacional, reduz tempos de resposta a falhas e otimiza a logística interna através de AR/VR e comunicação OPC UA. A arquitetura provou interoperabilidade e ganhos quantitativos (~ 14,2 % em tempo de execução; ~ 21,1 % em transporte com obstáculos). Persistem desafios de latência, alinhamento físico-digital e escala industrial, mas a solução estabelece uma base robusta para integração ciber-física e interfaces imersivas em contextos de Indústria 4.0.
					Internet das Coisas (IoT) – interligação cloud-CPS e M2M através de gateway/mediador. Computação em Nuvem – serviços SCADA/MES e armazenamento SQL em Windows Azure Pack. Big Data e Análise de Dados – serviços de processamento, event processing e OEE. Cibersegurança – VPN (eFive/OpenSSL) para acesso seguro.	- Arquitetura SOA+Cloud validada em duas divisões (estufa e linhas). - Cliente MES funcional (Windows) com monitorização e KPI/OEE. - HMI Android via VPN operacional com serviços SOA. - Acesso multi-tenant e integração com serviços externos (Google). - Comunicação event-based a diminuir chamadas e carga de rede.	O trabalho mostra que SOA + nuvem privada permitem construir um MES/SCADA interoperável, modular e acessível remotamente, com clientes móveis e serviços MES (incluindo OEE) a partir de dados field via gateway/mediador. A validação laboratorial comprova a viabilidade técnica e ganhos de integração, acessibilidade e redução de tráfego com comunicação por eventos. Persistem desafios de latência, segurança e escalabilidade para ambientes industriais reais, mas a abordagem estabelece uma base sólida para integração ciber-física e migração progressiva de funcionalidades MES para a nuvem.

<i>Making Cognitive Ergonomics in the Human-Computer Interaction of Manufacturing Execution Systems Assessable: Experimental and Validation Approaches to Closing Research Gaps</i>	Andreas Dörner; Marek Bures; Michal Simoni; Gerald Pirkl	2024	Caso Real	Sim	- Experimento "pronto a executar" para avaliar ergonomia cognitiva no MES. - Indicadores fisiológicos e NASA-TLX selecionados e testados. - Amostras piloto indicam demanda mental média = 8,00 e baixa variância em itens TLX. - Proposta de validação combinada objetiva+subjetiva com escala codificada por cores. Internet das Coisas (IoT) – recolha de dados fisiológicos via wearables e sensores conectados; integração com o posto MES/HMI no shop floor experimental.	- Diferenças de GSR/FC pequenas exigem GUIs mais contrastantes entre cenários. - Anosira reduzida no piloto. - Necessidade de >32 participantes. - Limitações da NASA-TLX como medida subjetiva. - Reforçar medidas objetivas. - Termografia a melhorar para consistência da temperatura corporal.	O estudo disponibiliza um protocolo experimental robusto para avaliar ergonomia cognitiva na interação com o MES, articulando medidas fisiológicas e questionários padronizados. As amostras piloto mostram viabilidade e utilidade do método, embora seja necessário aumentar o contraste entre interfaces e a dimensão amostral para obter efeitos mais salientes. A abordagem de validação proposta, combinando medidas objetivas e subjetivas numa escala codificada por cores, oferece um caminho prático para comparar interfaces e apoiar o redesenho de HMI em contextos de produção discreta.
<i>The Industrial Management of SMEs in the Era of Industry 4.0</i>	Alexandre Moeuf; Régis Pellerin; Said Lamouri; Samuel Tamayo; Yves Barbaray	2017	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) – sensores e conectividade para recolha automática. Computação em Nuvem – serviços escaláveis e pay-per-use. Big Data e Análise de Dados – tratamento e exploração de dados operacionais. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração entre mundo físico e digital. Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV) – suporte a operações e formação. Cibersegurança – proteção de dados e de infraestrutura conectada.	- Base sólida para rastreabilidade e disciplina operacional. - Melhoria da qualidade e do cumprimento de prazos. - Estruturação de dados para indicadores e auditoria. - Referencial para transição ordenada rumo a I4.0. - Custo e rigidez percebidos em PME. - Dificuldade de alinhamento com maturidade digital. - Falta de interoperabilidade semântica e normalização. - Escassez de competências digitais e resistência à mudança.	O estudo posiciona o MES como referência funcional para execução e rastreabilidade, mas reconhece limitações de custo e flexibilidade em PME. A Indústria 4.0 oferece alternativas modulares suportadas por IoT, computação em nuvem e análise de dados que permitem trajetórias de adoção faseadas com menor investimento inicial. A criação de valor depende da qualidade dos dados, da interoperabilidade e da capacitação das equipas. A transição recomendada combina práticas do MES com serviços digitais escaláveis, privilegiando ganhos incrementais e alinhamento com os objetivos de negócio.
<i>Assessing to what extent smart manufacturing builds on lean principles</i>	Jos A.C. Bokhorst; Wilfred Knol; Jannes Slomp; Thomas Bortolotti	2022	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) Sistemas Ciberfísicos (CPS) Automação Flexível Rastreabilidade Digital (RFID, BLE, UWB)	- Empresas "lean e smart" apresentam melhor desempenho de custos. - A combinação lean + smart supera os não-adoptantes em qualidade e entrega. - O MES tem a mais forte relação de dependência face ao lean. - Lean é condição necessária para níveis elevados de digitalização. - Dificuldade de adoção em PME devido a recursos limitados. - Complexidade técnica e necessidade de competências digitais. - Falta de compreensão sobre a sequência adequada lean-smart.	O estudo conclui que as tecnologias de fabrico inteligente, incluindo o MES, exigem a presença de princípios lean para alcançar implementação eficaz. A combinação lean-smart traduz-se em melhor desempenho de custos, embora o lean por si só assegure melhorias em qualidade e entrega. A investigação mostra empiricamente que o MES representa uma tecnologia dependente da maturidade lean e que a integração bem-sucedida exige processos previamente simplificados e normalizados. O modelo contribui para orientar a adoção sequencial de práticas lean antes da digitalização.

Virtual Factory Model Development for AI-Driven Optimization in Manufacturing	Tónis Raamets; Kristo Karjust; Algar Hermaste; Karolin Kelpman	2025	Caso Real	Sim	- Teste de cenários sem impacto na operação atual. - Identificação dos 5 piores e 5 melhores postos por OEE. - Recomendações para equilibrar recursos e reduzir tempos mortos. - Suporte a decisões de investimento com base em dados.	- Transferência de ganhos do ambiente virtual para o real. - Calibração contínua do DT com dados MES fiáveis. - Escalabilidade e manutenção do pipeline de dados.	A abordagem que combina fábrica virtual, recolha em tempo real via MES e análise com IA mostra utilidade para identificar ineficiências e orientar melhorias antes de alterações físicas. O modelo permite simular layouts, balancear recursos e priorizar ações, apoiando planeamento e decisões de investimento. A eficácia depende da qualidade dos dados e da atualização do modelo, mas o enquadramento revela-se escalável e custo-eficiente para aumentar OEE e resiliência operacional em ambientes de fabrico de madeira.
					Machine Learning - (MLR, Polinomial, Lasso, Ridge, Random Forest, Gradient Boost, MGCV, KNN) - previsão de OEE. Big Data e Análise de Dados - processamento de grandes volumes de dados de produção e avaliação por RMSE.	- Melhor RMSE médio ≈ 0,0464-0,0465 com alternância RF+MLR ou RF+MGCV. - Melhoria de precisão entre +3,8% e +19,2% face a modelos sem alternância. - Generalizável a unidades com dados recolhidos por MES/ERP.	- Necessidade de testar outros splits de treino/teste e janelas. - Requer validação noutras linhas de montagem semelhantes.
Prediction of Overall Equipment Effectiveness in Assembly Processes Using Machine Learning	Péter Dobra; János Jósvai	2024	Caso Real	Sim			
Exploring Key Factors for Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) within the Framework of Industry 4.0 for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) in the Manufacturing Sector	Caroline Gomes, Eduarda Busanello, Bruno Padilha, Laura Visintainer Lerman, Verónica Maurer Tabim	2024	Caso Real	Sim	- Desenvolvimento de um modelo integrador DOI+TOE para adoção do MES. - Melhoria da compreensão das barreiras em PME. - Criação de um quadro de maturidade para avaliação de prontidão digital. - Identificação de fatores críticos de sucesso e alinhamento estratégico.	- Falta de conhecimento e competências digitais. - Limitações financeiras e de investimento. - Estruturas organizacionais pouco ágeis. - Resistência cultural à digitalização. - Dificuldade em comunicar o valor do MES a decisores das PME.	O estudo evidencia que a adoção do MES pelas PME depende de fatores tecnológicos, organizacionais e ambientais. A integração dos modelos DOI e TOE permite compreender as barreiras e delinear estratégias eficazes para a implementação. O modelo conceptual proposto contribui para reduzir incertezas e orientar decisões no contexto da Indústria 4.0. A investigação destaca a importância da cultura digital, da liderança e do alinhamento estratégico para assegurar a maturidade tecnológica e a competitividade sustentável das PME.

Companies' Perception toward Manufacturing Execution Systems	Adil Aramja, Oualid Kamach, Rachid Elmezziane	2021	Caso real	Parcialmente	Internet das Coisas (IoT) - integração com SCADA e recolha automática de dados. Big Data e Análise de Dados - tratamento de dados de produção e desempenho. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - ligação entre MES, ERP e chão de fábrica.	- Confirmação estatística da relação positiva entre integração e utilidade percebida ($\beta=0.54$, $p<0.01$). - Identificação de módulos mais valorizados: QM, KPI, DAM e TRK. - Reforço da importância do perfil da empresa (indústria e processo) para sucesso do MES. - Mostra a fraca integração ERP-MES nas empresas emergentes.	- Integração limitada ERP-MES em mercados emergentes. - Falta de referência arquitetónica comum (ISA-95/B2MML). - Discordâncias entre departamentos comercial e produção. - Carência de competências locais e dependência de integradores internacionais.	O estudo conclui que a perceção positiva do MES depende fortemente das capacidades de integração e do perfil das empresas. As empresas que integram MES com SCADA e MRP apresentam maior maturidade digital e ganhos operacionais. No entanto, a fraca integração com ERP e a ausência de padrões comuns continuam a limitar o potencial da Indústria 4.0 em economias emergentes. O modelo PLS-SEM comprova o impacto estatisticamente significativo da integração e do contexto empresarial na adoção e sucesso do MES.
	Kamil Daniewski, Ewelina Kosicka, Dariusz Mazurkiewicz	2018	Caso Real	Não	O estudo centra-se na correção de indicadores em MES	- Detetada impossibilidade física de MTTR $\approx$ 1 min devido a má classificação. - Identificado OEE = 108% por fórmula/visualização incorreta - Esclarecida necessidade de redefinir regras de eventos e parâmetros. - Enquadramento para uso correto de indicadores na melhoria da manutenção.	- Configuração inadequada por fornecedor externo. - Indicadores não definidos previamente e ausência de objetivos claros. - Risco de decisões erradas por métricas enviesadas.	A avaliação revelou irregularidades significativas nos cálculos e na visualização dos indicadores de manutenção produzidos pelo MES, inviabilizando a sua função de controlo e melhoria. A correção exige definição prévia e inequívoca dos indicadores, alinhamento com objetivos SMART e reparametrização do sistema, incluindo regras de classificação de eventos e fórmulas de cálculo. Só com métricas corretas é possível suportar decisões fiáveis, reduzir custos e melhorar a eficácia dos serviços de manutenção.
Analysis of the Correctness of Determination of the Effectiveness of Maintenance Service Actions	Mukund Subramanian, Anders Skoogh, Hans Salomonsson, Pramod Bangalore, Maheshwaran Gopalakrishnan	2018	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) - recolha e comunicação de dados de sensores industriais via MES. Big Data e Análise de Dados - tratamento de grandes volumes de informação de máquina. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - ligação entre equipamentos e sistemas analíticos para diagnóstico em tempo real.	- Identificação automática de gargalos em linhas de produção reais. - Redução do tempo de diagnóstico e decisão operacional. - Melhoria da eficiência e do <i>throughput</i> global. - Integração direta entre dados MES e análise estatística.	- Necessidade de grandes conjuntos de dados históricos fiáveis. - Complexidade na integração e limpeza de dados MES. - Dependência de infraestrutura de recolha e armazenamento robusta. - Limitação analítica a dados de desempenho, não de qualidade.	O estudo mostra que a utilização de algoritmos baseados em dados reais de MES constitui uma alternativa fiável aos métodos de simulação, permitindo detetar e compreender gargalos de produção em tempo real. A abordagem proposta reforça a importância de soluções analíticas orientadas a dados para apoiar decisões operacionais, promovendo a produtividade e a eficiência das fábricas digitais. O trabalho valida a viabilidade prática da integração MES-análise estatística e sugere o seu potencial para evoluir em direção a sistemas inteligentes e autoajustáveis.
Data-driven algorithm for throughput bottleneck analysis of production systems								

Integration of Information Technology and Automation: Facilitators and Barriers	Claudia Tomie Yukishima Zúge; Sérgio Luiz Pereira; Eduardo Mário Dias	2010	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) - via RFID para identificação automática de camionetas e cargas. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - através da ligação ERP-MES-PLC com sincronização em tempo real entre níveis físico e digital. Computação em Nuvem - referida implicitamente pela arquitetura web-based e interfaces SAP XI para interligação de bases de dados e serviços.	- Aumento da rastreabilidade e da visibilidade do processo. - Integração total entre níveis corporativo e operacional. - Redução de intervenções humanas e erros de comunicação. - Melhoría na manutenção e na gestão de históricos de equipamentos.	- Diferença nos ciclos de vida de hardware IT e AT. - Resistência à interligação de redes industriais com redes corporativas. - Falta de profissionais com competência em ambas as áreas. - Ausência de métricas de maturidade para avaliar nível de integração.	A integração entre as áreas de TI e Automação é crítica para garantir eficiência e competitividade industrial. O caso do terminal portuário mostra que a comunicação bidirecional ERP-MES-PLC e a rastreabilidade via RFID aumentam significativamente a eficácia operacional. Contudo, persistem barreiras relacionadas com segurança de redes, compatibilidade de hardware e lacunas de formação técnica. O trabalho recomenda investir em padronização ISA-95 e em métricas de avaliação de integração para suportar a transição plena para a Indústria 4.0.	
	Developing Integrated Performance Measurement System – Using MDA Approach	Souhail Sekkat; Jean-Luc Paris; Khalid Kouiss; Janah Saadi; Laurent Deshayes	2010	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) - via integração OPC UA e sensores conectados para recolha automática de dados do chão-de-fábrica. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - pela ligação entre elementos físicos (CNC, robôs, sensores) e modelos digitais no MES. Simulação e Gémeos Digitais - através da modelação UML e validação por SCADA COSIMIR. Computação em Nuvem - implícita na utilização de arquitetura distribuída e interoperável (SOA, EAI).	- Implementação bem-sucedida do PMS integrado na célula ENSAM. - Recolha automática de dados e cálculo de OEE. - Redução do esforço de integração entre ferramentas industriais. - Aumento da flexibilidade e interoperabilidade do sistema.	- Complexidade de integração entre múltiplos protocolos (OPC, CORBA, SOAP). - Dificuldade de manutenção e atualização dos modelos UML/MDA. - Escassez de padrões abertos totalmente compatíveis. - Requisitos elevados de interoperabilidade e segurança de dados.	O trabalho confirma a eficácia da abordagem MDA para o desenvolvimento de sistemas de medição de desempenho integrados no MES. A combinação de modelação UML, interoperabilidade OPC/CORBA e arquitetura orientada a serviços demonstrou ser uma via sólida para integrar níveis de controlo e gestão. A implementação experimental em célula CNC comprovou ganhos de interoperabilidade e flexibilidade. Contudo, a complexidade técnica e a falta de padronização total continuam a limitar a sua adoção industrial em larga escala.
	Schedule Execution in Autonomic Manufacturing Execution Systems	Paul Valckenaers; Hendrik Van Brussel; Paul Verstraete; Bart Saint Germain; Hadel	2007	Caso Real	Sim	Inteligência Artificial (IA) - aplicada através de sistemas multi-agente e mecanismos de decisão descentralizada. Simulação e Gémeos Digitais - usada para validar o comportamento do sistema e prever estados futuros (forecasting simulado). Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - representados pelos agentes de recurso e ordem que interagem entre entidades físicas e modelos digitais.	- O MES seguiu eficazmente planos viáveis, mantendo autonomia. - Reduziu desvios de <i>lead time</i> com maior <i>slack time</i>. - Comportamento robusto face a perturbações e planos incompletos. - Arquitetura provou escalabilidade e adaptabilidade conceptual.	- Incapacidade de seguir planos totalmente inviáveis. - Necessidade de quantificar “aderência ao plano”. - Falta de critérios universais de conformidade ao escalonamento. - Requer desenvolvimento adicional para integração em casos industriais reais.	O estudo apresenta uma arquitetura autônômica e holónica que permite ao MES executar planos de produção de forma adaptativa e descentralizada. Os resultados experimentais confirmam que o sistema segue eficazmente planos viáveis, mantendo flexibilidade e robustez. Contudo, a escalabilidade e a gestão de planos inviáveis permanecem desafios. O trabalho abre caminho para a cooperação inteligente entre escalonadores e sistemas de execução, aproximando o conceito de autonomia cognitiva na Indústria 4.0.

<i>Manufacturing Execution Systems for Customized Production</i>	Jean Marcelo Simão; Paulo César Stadzisz; Gérard Morel	2006	Caso Real	Sim	Inteligência Artificial (IA) - através de sistemas multi-agente e motor de inferência baseado em regras. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - via interligação entre holons de produto (físico + digital) e holons de recurso. Simulação e Gêmeos Digitais - implementação e validação no ambiente de simulação ANALYTICE II. Internet das Coisas (IoT) - referida como tecnologia de identificação automática (RFID) para smart-products.	- Meta-modelo holônico implementado com sucesso no ANALYTICE II. - Mostrações de produção sem planejamento prévio (just-in-time). - Melhoria da utilização de buffers e distribuição de carga em estações. - Evidência de execução autônoma em cenários de customização em massa.	- Complexidade da coordenação entre holons produto/recurso. - Necessidade de resolver conflitos de regras e sincronização. - Falta de padronização para interfaces holônicas industriais. - Transição difícil de ambientes simulados para ambientes reais.	O artigo propõe um modelo holônico de MES capaz de suportar a customização em massa através de entidades autônomas e cooperativas. A integração entre smart-products e resource-holons mostra como a execução orientada a produto pode substituir estruturas hierárquicas por cooperação inteligente. O meta-modelo ANALYTICE II valida a abordagem, evidenciando ganhos de flexibilidade e auto-organização. A viabilidade em ambientes reais depende de normalização e maturidade das tecnologias de agentes industriais.
<i>Integration of Planning Systems and an Agent-Oriented MES</i>	Paul Verstraete; Paul Valkenaers; Bart Saint Germain; Hendrik Van Brussel; Hadeli	2006	Caso Real	Sim	Inteligência Artificial (IA) - através de sistemas multi-agente e comportamento social cooperativo. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - representação digital de máquinas, ordens e produtos via agentes interligados. Simulação e Gêmeos Digitais - uso de modelos virtuais e cenários simulados para validar o comportamento de execução. Internet das Coisas (IoT) - conceito implícito nas ligações contínuas entre agentes físicos e informacionais.	- Integração bem-sucedida entre sistemas de planejamento e execução multi-agente. - Redução significativa da taxa de re-planejamento. - Aumento da estabilidade global do sistema produtivo. - Capacidade de incorporar novos requisitos e restrições em tempo real.	- Dificuldade de padronização da cooperação MES-ERP. - Necessidade de garantir comportamento estável sob autonomia local. - Complexidade de transição de simulação para uso industrial. - Elevado esforço inicial de parametrização e validação.	O estudo mostra a viabilidade da integração entre sistemas de planejamento central e MES autônomos baseados em agentes. A arquitetura proposta mantém a autonomia local e reduz a dependência de re-planejamentos frequentes, tornando o sistema mais estável e resiliente a perturbações. A abordagem multi-agente confirma o potencial da cooperação descentralizada para equilibrar flexibilidade e previsibilidade, antecipando os princípios da Indústria 4.0. Persistem desafios de normalização, interoperabilidade e validação em contextos industriais reais.
<i>Data Model Design for Manufacturing Execution System</i>	Bing-hai Zhou; Shi-jin Wang; Li-feng Xi	2005	Caso Real	Sim	Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - integração entre dados físicos (recursos, equipamentos) e entidades digitais no modelo EER. Internet das Coisas (IoT) - comunicação contínua entre ERP, MES e sistemas de controle via redes locais (LAN). Simulação e Gêmeos Digitais - representação virtual do estado do sistema através das estruturas SSSS e SCSS para decisão em tempo real. Big Data e Análise de Dados - modelação relacional para suporte analítico de rastreabilidade e desempenho.	- Protótipo funcional MES desenvolvido em Visual C++ com base Access. - Estrutura de dados com mais de 80 tabelas integradas. - Suporte eficaz a planejamento detalhado e controle em tempo real. - Reconfiguração de layout e recursos verificada em ambiente experimental.	- Escalabilidade limitada a produção discreta. - Complexidade na transformação EER → modelo relacional. - Necessidade de padronização de interfaces e dados. - Dificuldade na manutenção de coerência entre entidades dinâmicas.	O estudo propõe um modelo de dados genérico e modular que suporta a integração total entre ERP, MES e sistemas de controle. A aplicação prática demonstrou que a abordagem EER é adequada para representar relações complexas entre recursos, planos e estados, proporcionando uma base robusta para desenvolvimento de MES flexível e reconfigurável. Embora limitado a produção discreta, o modelo oferece uma fundação sólida para arquiteturas interoperáveis e orientadas a dados, alinhadas com os princípios da Indústria 4.0.

<i>A data-driven approach toward a machine- and system-level performance monitoring digital twin for production lines</i>	Yaqing Xu; Yassine Qamsane; Saumuy Puchala; Annette Januszczak; Dawn M. Tilbury; Kira Barton	2024	Caso Real	Sim	Internet das Coisas (IoT) – recolha contínua de estados via PLC/MES. Computação em Nuvem – possibilidade de atualização runtime com armazenamento em cloud. Big Data e Análise de Dados – tratamento de séries temporais densas e KPIs. Machine Learning – regressão logística para previsão de Flow. Simulação e Gémeos Digitais – gémeo digital de monitorização de desempenho (nível de sistema). Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – integração PLC–MES—modelo para sincronização ciber–física.	- Previsão de Flow com $F1 = 0.94$ no Caso Industrial. - Seleção ótima de regularização com AUROC máximo em $C_p = 0.001$. - Detecção precoce de transições para fluxo turbulento. - Evidência de relações causa–efeito entre máquinas (montante/jusante).	- Calibração contínua dos limiares de Flow e janelas temporais (H, D). - Transferibilidade entre linhas com layouts e dinâmicas distintas. - Garantir volume/qualidade de dados para treino/validação.	A abordagem data-driven suportada por dados do MES permite monitorizar e prever o desempenho de linhas, combinando subestados de máquina, autómatos probabilísticos e regressão logística do fluxo produtivo. No caso automóvel analisado, o modelo atinge desempenho elevado e identifica interdependências entre operações, possibilitando ações proativas antes de degradações significativas. A utilidade como componente de um gémeo digital de monitorização é confirmada, embora persistam desafios de calibração, qualidade de dados e generalização a outros sistemas.
<i>The Industry 4.0 Revolution and the Future of Manufacturing Execution Systems (MES)</i>	Francisco Almada-Lobo	2015	Revisão sistemática	Sim	Internet das Coisas (IoT) – via RFID e sensores industriais). Computação em Nuvem – suporte a serviços e análises distribuídas. Big Data e Análise de Dados – modelos analíticos e data lakes para otimização. Manufatura Aditiva – Impressão 3D como tecnologia de customização. Robôs Autónomos – entidades CPPS inteligentes.. Sistemas Ciber-Físicos (CPS/CPPS) – para integração total física–virtual.	- Permite transparência em tempo real na cadeia de valor. - Aumenta a eficiência e a resposta a ordens personalizadas. - Cria as bases para um controlo autónomo e inteligente das operações.	- Resistência dos fornecedores de MES tradicionais à mudança para modelos descentralizados. - Incerteza quanto a padrões e interoperabilidade entre sistemas CPS/CPPS. - Desafios de cibersegurança e governação dos dados em ambientes abertos.	O estudo antecipa uma transformação profunda dos sistemas MES na era da Indústria 4.0, centrada na descentralização lógica e na integração total de dados e serviços. Evidencia-se a necessidade de reformular a arquitetura dos MES para lidar com entidades autónomas e ambientes ciber-físicos. As fábricas inteligentes passam a funcionar como ecossistemas interconectados em que materiais, equipamentos e processos negociam em tempo real. A conclusão destaca que a adoção destes princípios é essencial para a sustentabilidade competitiva da manufatura futura.
<i>Multi-level Production Control: Modern State, Problems, Prospects</i>	L. M. Yakovis	2010	Revisão sistemática	Sim	Simulação e Gémeos Digitais – utilizada para modelar e otimizar os processos industriais e para testar algoritmos de controlo (Matlab–Simulink). Inteligência Artificial (IA) – referida na forma de modelos heurísticos e técnicas de controlo adaptativo e robusto. Sistemas Ciber-Físicos (CPS) – conceito associado à integração de níveis físico (ACSP) e informacional (MES/ERP) num sistema hierárquico de controlo.	- Melhor coordenação entre níveis de controlo e gestão. - Aumento da eficiência energética e produtiva. - Maior transparência e visibilidade dos processos. - Potencial de evolução para sistemas analíticos inteligentes.	- Deficiente “nível intelectual” dos sistemas atuais. - Dificuldades na modelação matemática dos processos industriais. - Falta de padrões e integração inter-sistemas. - Limitações de formação e adaptação do pessoal operacional.	O artigo de Yakovis sintetiza a evolução dos sistemas de controlo de produção multinível, destacando a importância do MES como elo crítico entre automação e gestão. O autor identifica um défice de inteligência nos sistemas atuais e defende a adoção de modelos heurísticos, simulação e controlo robusto para melhorar a eficiência global. A integração ACSIP–MES–ERP é vista como essencial para a Indústria 4.0, mas persistem barreiras de integração e capacitação humana. O futuro passa por sistemas analíticos, adaptativos e co-projetados com os processos industriais.

Internet das Coisas (IoT) - via auto-identificação e recolha automática de dados (barcodes, RF). Sistemas Ciber-Físicos (CPS) - ligação entre recursos físicos e dados digitais em tempo real. Big Data e Análise de Dados - uso de informação para controlo e melhoria de processos. Computação em Nuvem - arquiteturas cliente-servidor e web para integração ERP/MES.	Patrick J. Rondeau; Lewis A. Litteral	2001	Revisão sistemática	Sim
- Redução média de 45 % no custo de fábrica (MESA survey). - Redução de 17 % no WIP e 32 % no lead-time. - 75 % Menos tempo de entrada de dados e 56 % menos documentação em papel. - 15 % Menos defeitos em produtos acabados.				

O artigo de Rondeau e Litteral constitui um marco na sistematização da evolução dos sistemas MPC, mostrando a passagem de estruturas manuais para sistemas inteligentes integrados (ERP/MES). Os autores evidenciam que a tecnologia da informação foi o agente central da transformação industrial, permitindo controlo em tempo real e integração horizontal da cadeia de valor. O MES é posicionado como a ponte entre planeamento e execução, abrindo caminho para a digitalização total da produção na Indústria 4.0.

- Ausência de padrões ERP/MES consolidados na época.
- Complexidade na migração de MRP II para ERP/MES.
- Resistência organizacional à mudança de processos.
- Necessidade de qualificação técnica para operações em tempo real.