CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

Associação Portuguesa de Fundição

# Manual da Indústria 4.0

NORTE2020
PROGRAMA OPERACIONAL REGIONAL DO NORTE

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

# FICHA TÉCNICA

**Projeto**
Capacitação do Setor de Fundição: a transição para uma economia circular e digital

**Código Projeto**
NORTE-02-0853-FEDER-037639

**Promotora**
Associação Portuguesa de Fundição (APF)

**Elaboração e Coordenação Técnica do Manual**
Magellan Circle

**Ano de Publicação do Manual**
2022

**Assessoria Científica**
INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores

**Cofinanciamento**

NORTE2020 PROGRAMA OPERACIONAL REGIONAL DO NORTE

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

Associação Portuguesa de Fundição

# Índice


1. Introdução
2. Estratégia Digital na Indústria e Metodologias de Implementação
3. Planeamento e Escalonamento na Produção
4. Simulação e Digital Twins
5. Controlo de Qualidade 4.0
6. Eficiência Energética
7. Automação de Processos e Robótica Industrial
8. Resumo e Conclusões
9. Bibliografia
10. Anexos

Associação
Portuguesa de
Fundição

# 1.

# INTRODUÇÃO

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 1. INTRODUÇÃO

Este manual pretende sistematizar um conjunto de elementos essenciais para a introdução da Indústria 4.0 às empresas do setor da fundição, com o objetivo de capacitar o setor para a sua transição digital e resposta aos desafios emergentes. Assim, pretende ser uma ferramenta de consulta destinada às indústrias e outros *stakeholders* do setor.

São integradas seis temáticas relacionadas com a indústria 4.0 e respetivos exemplos de aplicação prática, demonstrando tecnologias simplificadoras (*enabler* i4.0) para a transição digital da indústria da fundição, nomeadamente:

- Introdução à **estratégia digital na indústria e metodologias de implementação** e práticas para a implementação da Indústria 4.0.
- **Planeamento e escalonamento das operações e ordens de fabrico** com o objetivo de otimizar *setups* em tempo e consumo energético.
- **Simulação e Digital Twins** - modelação e simulação das operações e dos processos.
- **Controlo da Qualidade 4.0** - controlo da qualidade do processo com recurso a digitalização e aplicação de inteligência artificial.
- Tecnologias e técnicas de **eficiência energética** e simbiose industrial através da recuperação de calor.
- **Automação de Processos e Robótica Industrial** - processamento de imagem para qualidade do produto ao longo da cadeia de valor; automação e robótica colaborativa para processos de acabamento, paletização e expedição.

Desta forma, cada um destes seis temas será dividido em duas vertentes:

1. **Enquadramento** e descrição inicial de conceitos e metodologias associados à indústria 4.0.
2. **Exemplos de aplicações** destas metodologias a problemas concretos em contexto industrial.

Este trabalho foi desenvolvido pela Magellan Circle com assessoria científica do INESC TEC para a Associação Portuguesa de Fundição (APF) no âmbito do projeto “Capacitação do Setor da Fundição: A transição para uma economia circular e digital”, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional através do Programa Operacional Regional do Norte do PT2020, o NORTE2020. A atividade alinha-se com os objetivos do projeto, nomeadamente o reforço da capacitação empresarial das entidades do setor da fundição e qualificação dos seus ativos no domínio da indústria 4.0.

Associação
Portuguesa de
Fundição

# 2.

# ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 2.
# ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO
## ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

As organizações devem considerar uma série de questões e desafios estratégicos que enfrentam quando pretendem encetar as suas transformações digitais.

Neste contexto, é de enfatizar a necessidade de as empresas avaliarem os seus níveis de maturidade (digital) e de recorrerem a indicadores operacionais para identificar os aspetos a melhorar, de identificar a melhor abordagem a adotar e estabelecer um plano de ação concreto e continuamente monitorizável para implementar as medidas em causa. Para desenvolver a sua estratégia, importa a organização ter em conta o paradigma atual do mercado, caraterizado por um ambiente BANI:

Figura 1 – Ambiente BANI, que descreve as principais caraterísticas do paradigma atual do mundo [1].

- FRÁGIL – um ambiente frágil, decorrente de mudanças rápidas da lógica de mercado, seja por ações de concorrentes ou fatores externos como pandemias ou eventos geopolíticos. Assim, a posição da organização no mercado é permanentemente frágil.

- ANSIOSO – o ambiente é ansioso, no sentido em que as decisões são e devem ser tomadas rapidamente, pois um tempo de resposta maior pode ter efeitos nefastos.

- NÃO LINEAR – não existe proporcionalidade nos resultados obtidos por certas medidas. Uma pequena decisão pode ter consequências em larga escala e um grande esforço pode trazer poucos resultados.

- INCOMPREENSÍVEL – a complexidade dos sistemas e a quantidade de dados e informações disponíveis tornam as causas dos eventos pouco óbvias ou indecifráveis.

# 2.
# ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO
## ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

A indústria transformadora tem verificado um aumento da complexidade dos produtos. Isto exige às empresas:

- **Produção individualizada** e com elevada eficiência;
- Capacidade de dar resposta à **variabilidade dos mercados**;
- **Ciclos de vida reduzidos**, de forma a utilizar os recursos de forma eficiente.

O gráfico seguinte ilustra a procura crescente por produtos customizados. Desde meados dos século XIX até meados do século XX, a produção crescente em massa e com menor variedade de produtos foi a principal tendência, sendo que desde então tem-se assistido a uma tendência de "customização em massa", com a complexidade e variedade dos produtos a aumentar cada vez mais.

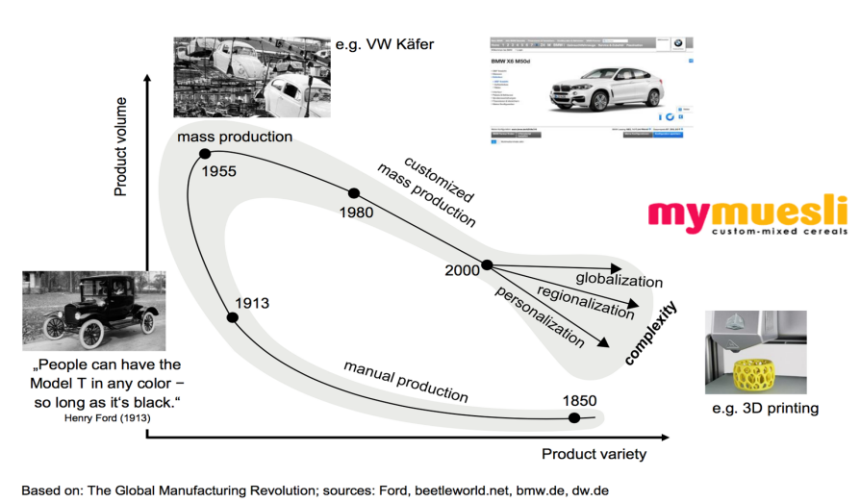



Figura 2 – Evolução da variedade e volume do fabrico de produtos desde 1850. [2]

# 2. ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO

# ENQUADRAMENTO

## Transformação Digital

A transformação digital é uma estratégia que recorre à digitalização de processos para maximizar a performance e promover melhorias com impacto positivo nos resultados finais. Representa uma mudança de comportamento empresarial e, como tal, deve envolver os colaboradores e gerar impactos em processos e na própria estrutura da empresa.

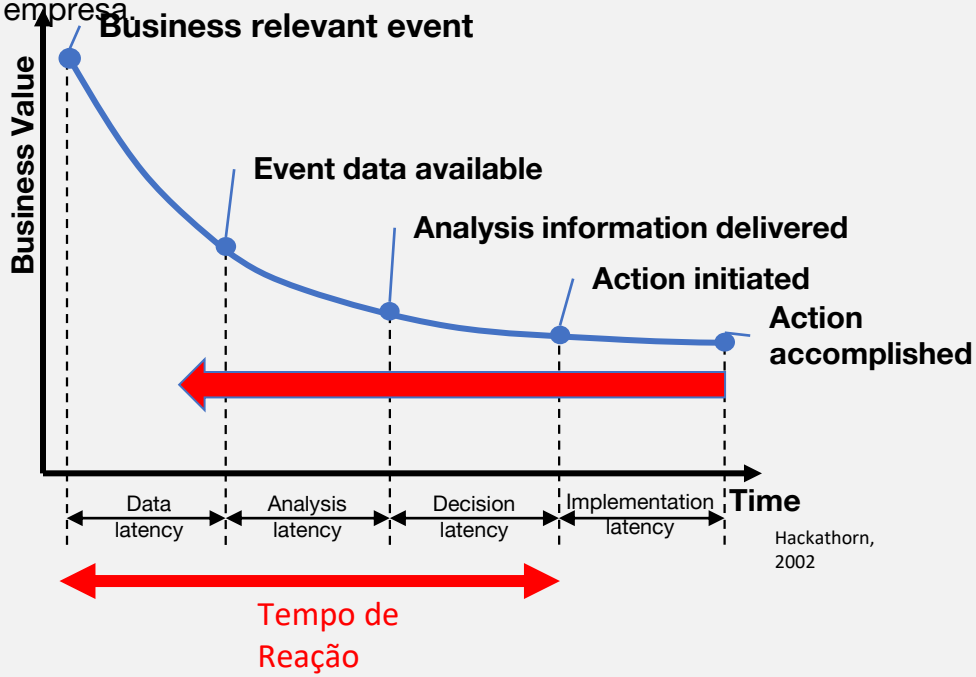



Gráfico 1 – Perda de valor relativamente ao tempo de reação depois de um evento relevante. [3]

No contexto de uma indústria, a **latência** é uma barreira à agilidade. O gráfico anterior ilustra a forma como o **tempo de reação** perante um evento relevante na empresa leva a uma **perda de valor** no negócio. Este tempo de reação, e por sua vez a perda de valor associada, podem ser diminuídas através da implementação de elementos da indústria 4.0, que é fator chave para a agilidade.

Os objetivos típicos da transformação digital são: eficiência, resposta, flexibilidade e qualidade, que por sua vez se dividem em vários subobjetivos, como elenca a imagem seguinte.

Figura 3 – Objetivos e sub-objetivos típicos da transformação digital das organizações. (© Mckinsey)

# 2. ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO

## ENQUADRAMENTO

Existem **três tipos principais de digitalização**.

1. *Efficiency-driven*: O aumento da eficiência e da escala da digitalização afetará as cadeias de produção (ex. a aplicação de automação no setor de logística).
2. *Evolution-driven*: No que diz respeito à evolução de novos produtos e serviços, (ex. o aparecimento de tecnologias inteligentes que permitam novos tipos de canais de interação).
3. *Market-growth oriented*: No que diz respeito à aplicação da digitalização para abrir novos mercados e desenvolver novos modelos de negócios (ex. novos serviços pós-venda).

A transformação para a indústria 4.0 tem impacto na produção e crescimento das empresas, como elencado no quadro seguinte:

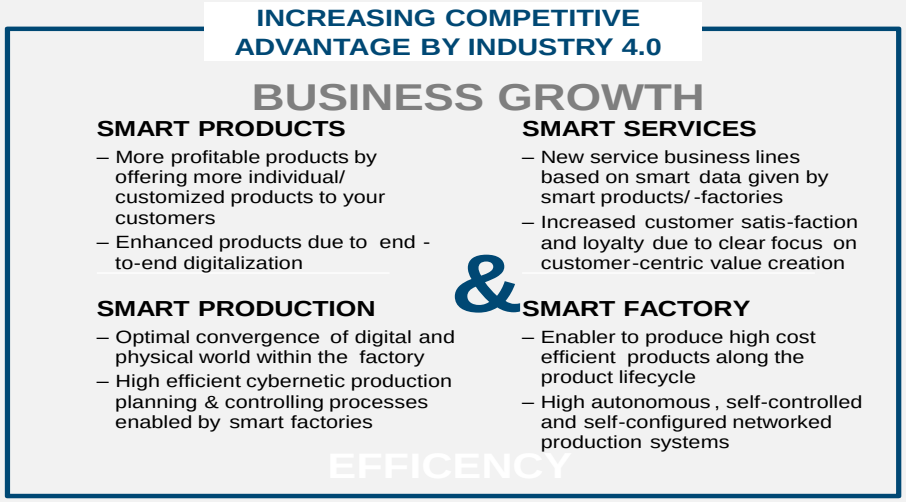
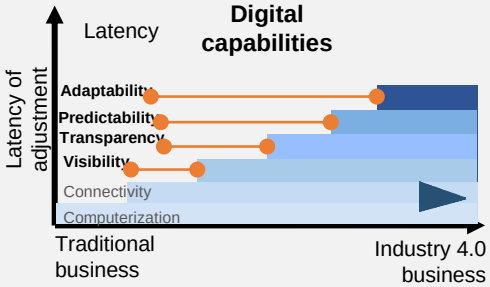
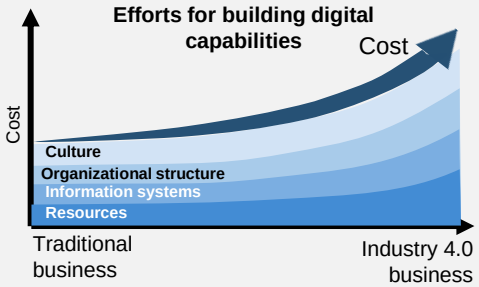



Figura 4 – Aspetos da vantagem competitiva resultantes da indústria 4.0. (© Mckinsey)

Importa referir que, apesar dos benefícios potenciais consideráveis, o ganho de capacidades digitais implica custos de transformação elevados, que seguem a lógica ilustrada nos gráficos seguintes:




A transição digital e a quarta Revolução Industrial, através da introdução da Internet das Coisas (IoT) e dos serviços e a fusão do real e virtual, apresentam, por um lado, desafios estratégicos e operacionais, por outro lado, oportunidades potencialmente enormes para a indústria (portuguesa).

### Maturidade 4.0

A **avaliação da "maturidade i4.0"** de uma organização é o primeiro passo para aferir o seu ponto de situação relativamente à sua digitalização 4.0, bem como os requisitos, desafios e oportunidades que se perspetivam para a implementação de uma estratégia digital. De forma cíclica, esta segue diversas **etapas**:

1. Avaliar a Maturidade i4.0
2. Desenhar Organização i4.0
3. Planear Implementação i4.0
4. Operacionalizar i4.0

# 2.
# ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO
## ENQUADRAMENTO

Relativamente aos aspetos de informatização e conetividade desenvolvidos na indústria 3.0, a transformação para a indústria 4.0 permite diversas valências encadeadas ao nível da **visibilidade constante** dos processos industriais, da **maior transparência** nos processos e interface entre operadores e máquinas, da **maior previsibilidade** que advém de uma recolha e análise mais exaustiva de dados e aplicação de técnicas de previsão. Estes aspetos combinados permitem uma maior capacidade de adaptação das empresas face a novas situações.

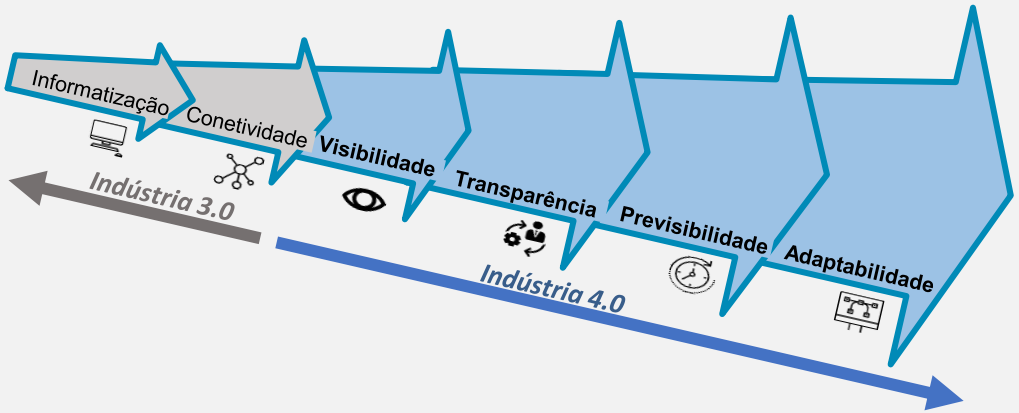



Figura 5 – Valências da indústria 4.0 relativamente à 3.0 (© INESC TEC)

A avaliação da "maturidade i4.0" envolve diversas dimensões de análise (multidisciplinaridade), que estão ilustradas no esquema seguinte.

Figura 6 – Dimensões de análise da avaliação da maturidade i4.0 (© INESC TEC)

Estas **dimensões** traduzem-se na avaliação da maturidade num quadro de referência i4.0, permitindo localizar a situação atual da organização e simultaneamente quantificar o seu 'gap' relativamente à 'visão i4.0'. Em cada dimensão são avaliados diversos eixos explorando-se todo o domínio inerente a essa dimensão.

Este "diagnóstico" da maturidade 4.0 informa a fase seguinte de "Desenhar Organização i4.0", que se inicia desenvolvendo um roteiro para a transformação da organização.

# 2. ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO

## ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

### Estratégia de Transformação

Uma organização deve caminhar para se tornar numa "smart organization", apostando em dois eixos: na liderança pela inovação e na excelência operacional.

Para uma estratégia competitiva, é essencial a organização ter uma **estratégia de operações** definida e disseminada que envolva os diferentes vértices:

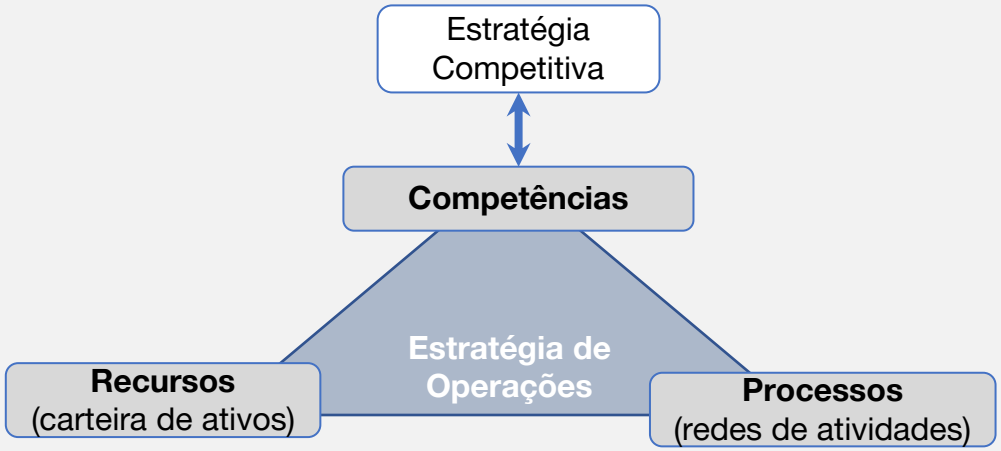



Figura 7 – Vértices da estratégia de operações de uma organização (© Américo Azevedo).

As organizações também devem estar alerta para o desafio do **'trade-off" operacional**, ou seja, a otimização do conflito existente entre a capacidade de customização (variedade) e a eficiência do custo dos produtos. O gráfico seguinte representa a relação entre estas duas variáveis.

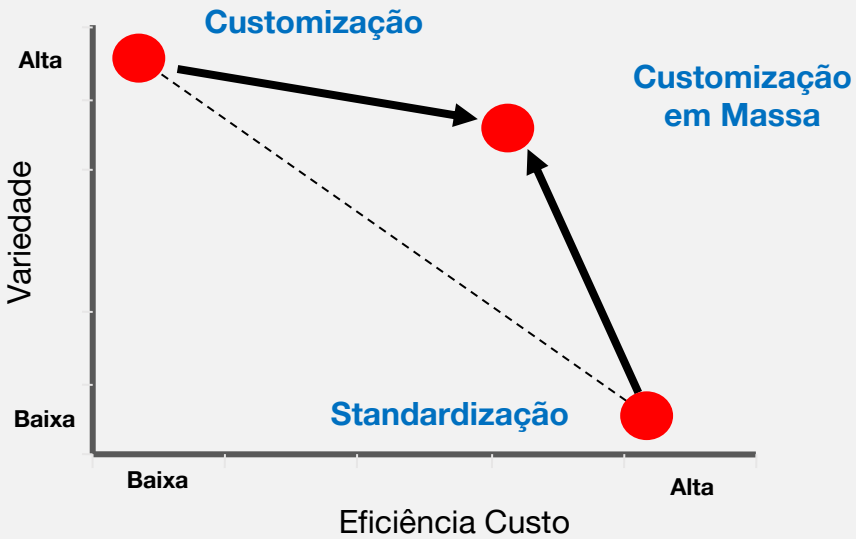



Gráfico 4 – Trade-off operacional entre eficiência de custo e variedade de produto (© Américo Azevedo).

As estratégias para impulsionar as PME na sua transformação digital devem seguir uma série de aspetos da sua atividade:

Transformação da relação com o cliente

- Novos canais de interação.
- Apostar no *customer intelligence* pode transformar a experiência de vendas.

Transformação dos processos operacionais

- Incrementar o nível de maturidade digital ao nível dos processos operacionais.
- Capturar, organizar e partilhar o conhecimento.

Transformação do modelo de negócio

- Pensar em produto e serviço.

# 2.
# ESTRATÉGIA DIGITAL NA INDÚSTRIA E METODOLOGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Desenvolver e implementar a estratégia de transformação**

1. **Definir e adotar uma estratégia** para o negócio da organização (horizonte a 3 anos)
    1. Definir e detalhar as curvas de valor para as propostas a oferecer a cada segmento de Mercado
    2. Definir e delinear o mapa relacional com os factores críticos de sucesso
    3. Definir objetivos e métricas de quantificação
    4. Criar plano de execução
2. **Construir *pool* de talento** identificando e integrando parcerias (centros de competência, entidades I&D) que possam abranger o contexto geral e específico da organização
3. **Quantificar GAP para a visão** desenhando e adotando uma metodologia que apoie a iniciativa organizacional em torno da sua transformação digital
    1. Avaliar o grau de maturidade da organização
    2. Definir a visão relativa às digital capabilities da organização (horizonte a 3 anos)

**4. Definir e detalhar o roteiro de transformação** para garantir a visão

1. A importância de um quadro de referência, de ferramentas e de parcerias
2. Selecionar projetos piloto para provas de conceito

**5. Executar e avaliar**

Entre os vários ingredientes para o sucesso da estratégia de transformação i4.0, são de enaltecer: um roteiro claro para alcançar objetivos bem definidos, excelência na execução, uma equipa de alta qualidade e os parceiros certos para a organização.

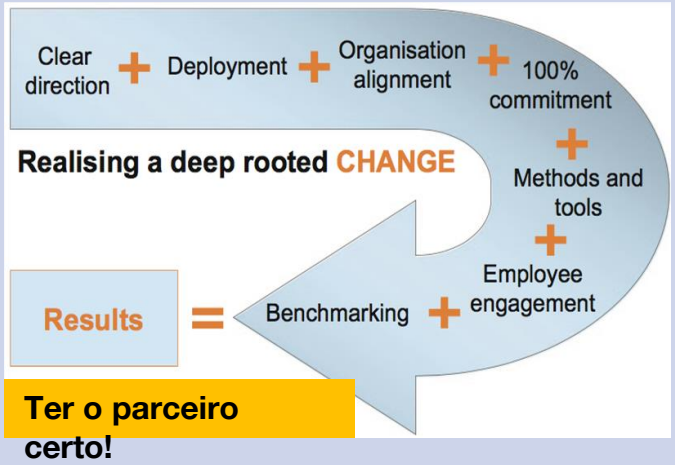



Figura 8 – Direção e ingredientes para uma implementação bem sucedida de uma estratégia de transformação (© EFESO Consulting).

Associação
Portuguesa de
Fundição

# 3.

# PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO NA PRODUÇÃO

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 3. PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO

## ENQUADRAMENTO

O **escalonamento de operações** é a alocação no tempo de operações a recursos limitados (centros de trabalho – máquinas, recursos humanos especializados, ferramentas), respeitando **restrições fortes** e minimizando as penalidades associadas a **restrições fracas**. Esta alocação pode resolver um problema combinatório, no qual uma solução é uma sequência ordenada de operações, ou uma otimização multiobjectivo, no qual uma solução que se comporta bem para um objetivo pode não responder bem a outro objetivo, sendo necessário procurar **soluções de compromisso**.

Para alcançar os objetivos existe uma série de **restrições e exequibilidade das soluções** como operações fixas, calendários e turnos, horizontes de planeamento, *set-ups* e tempos de mudança, etc. Os objetivos "tradicionais" passam por minimizar atrasos, maximizar ocupação das máquinas, tempos de mudança, satisfação de clientes, etc.

Para o escalonamento ótimo das operações, existem **sistemas de apoio à decisão** que utilizam dados internos e externos, tratados por modelos e algoritmos customizados, que transmitem informação relevante ao decisor através de um interface.

Frequentemente, os sistemas integrados de gestão empresarial (ERP) ou mesmo aplicações de escalonamento não consideram aspetos como o retrabalho, capacidade dependendo das características do produto/processo, necessidade de sub-recursos (ex. ferramentas e trabalhadores especializados), produzindo assim soluções que diferem substancialmente da realidade.

**Motor de escalonamento do INESCTEC / CESE**

Os desafios aos quais se tem de dar resposta nos **problemas de escalonamento** são a necessidade de:

- Obter rapidamente uma solução (milhares de operações em minutos).
- Considerar mais do que um objetivo (ex. minimizar entregas fora do prazo e minimizar o custo da solução).
- Respeitar todas as restrições, sendo capaz de mapear corretamente o sistema de fabrico.
- Caracterizar as soluções com um conjunto de indicadores quantitativos, que funcionarão como um sistema de suporte à decisão, permitindo a avaliação e comparação de soluções alternativas.

# 3.
# PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO
## ENQUADRAMENTO

Os **sistemas ERP** são sistemas integrados para gestão empresarial. Estes permitem obter informação sobre o modelo de capacidade atualizado (máquinas, calendários, recursos humanos especializados e ferramentas), bem como informação sobre as ordens de fabrico em execução e sobre as novas a planear.

Esta 'fotografia' do estado atual do sistema produtivo, denominada **sessão**, servirá de base a múltiplos exercícios de escalonamento, comparáveis entre si, designados por **programações**.

Para o **motor de escalonamento**, tem de se definir um horizonte de planeamento (intervalo de tempo) a partir da data de início para a qual queremos obter um plano (podem-se também definir sub-intervalos). As operações já em execução e outras previamente escalonadas para esse período têm prioridade sobre todas as outras a escalonar, com algumas exceções (que nunca podem interromper operações em execução).

Estes fatores levantam questões de **otimização global vs local.** Após a ordenação das ordens de fabrico, o algoritmo escalona operação a operação sendo realizada uma **otimização local,** desde que os indicadores associados aos objetivos selecionados não sejam colocados em causa.

Se o objetivo de otimização global não estiver colocado em causa, o algoritmo pode ordenar localmente as operações de acordo com regras pré-definidas, independentemente dos objetivos escolhidos.

**Modelo de informação do motor de escalonamento**

O motor de escalonamento do INESC TEC tem associado um **modelo de informação** *standard* baseado na norma ISA 95, que facilita a integração com sistemas legados através de ficheiros XML e serviços WEB, entre outros formatos.

O produto pode ter várias características (ex. cor, diâmetro, material). Quando se estão a escalonar operações num determinado recurso, duas operações consecutivas com valores distintos para uma ou mais características podem implicar um **tempo de mudança** adicional e, portanto, uma penalidade que aumenta os custos de produção.

Para processar uma operação num **recurso**, podemos precisar de ajuda quantificável adicional de um recurso especializado ou da presença de uma ferramenta específica durante o setup/mudança, execução ou ambos (ex. "necessário 50% da capacidade de um eletricista durante a configuração", pelo que o eletricista pode dar suporte a outra operação ao mesmo tempo). A operação só pode ser agendada se o recurso e os **sub-recursos** especificados estiverem disponíveis simultaneamente.

# 3.
# PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO
# APLICAÇÕES

Um **exemplo ilustrativo** do escalonamento de **(sub)recursos** na indústria e dos elementos a considerar é o seguinte:

Sub-recurso: moldes permanentes numa indústria de injeção de alumínio. Ao fim de N utilizações os moldes vão para o departamento técnico para verificação e reparações. Devem-se considerar os seguintes elementos:

- Capacidade do departamento técnico;
- Tempos de transporte;
- Tempos de afinação, nº de peças de afinação (aproveitáveis ou não);
- Operários especializados responsáveis pela mudança de moldes nas máquinas de injeção de alumínio.

Cada recurso possui um **calendário com turnos** definidos que podem sofrer alterações ao longo do horizonte de planeamento. Normalmente as operações só serão agendadas em períodos de trabalho, embora a execução de operações possa (forno que iniciou um ciclo dentro de um período de trabalho pode terminar a sua execução após o fim do turno). Podemos também especificar **paragens de recursos e alterações de capacidade** (ex. configurar uma mudança de capacidade de 5 para 3 operários num determinado período).

## APLICAÇÕES

### Modelação de cenários de escalonamento

Cenário 1 - Integração entre duas fases de produção (fundição & maquinagem)

É necessário planear as operações de injeção e acabamento que não se encontram integradas, de forma a sincronizar os seus períodos de forma eficiente e assegurar que as datas de entrega são cumpridas. Desta forma, a solução passa por um escalonamento faseado dividido nas seguintes etapas:

**01.** Escalonamento das operações de acabamento das peças.

**02.** Determinar a data e hora de necessidade para peças de injeção.

**03.** Escalonamento da secção de injeção considerando as datas e horas de necessidade para a seção de acabamento.

**04.** Se as datas de início de maquinagem CNC não forem cumpridas, elas serão transformadas em novas datas de início possíveis para essas operações.

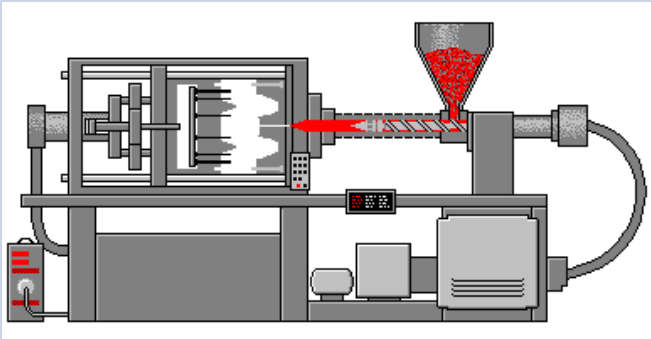
**05.** Reescalonar as operações de acabamento e atualizar as informações de datas de entrega aos clientes.

# 3. PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO

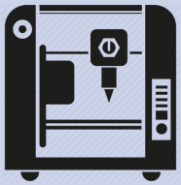
## APLICAÇÕES

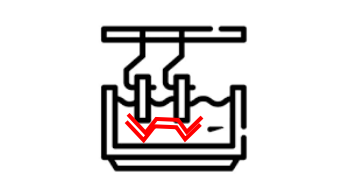
De seguida, pode-se ver uma ilustração dos procedimentos associados a este cenário:

**Secção de máquinas de injeção n máquinas, gestão de moldes**



**Transporte**





**m máquinas CNC** **Tratamento galvánico** **Embalagem**

Figura 9 – Integração entre duas fases de produção (fundição & maquinagem) (© INESC TEC).

Cenário 2 - BOM multinível, data e hora operacionais

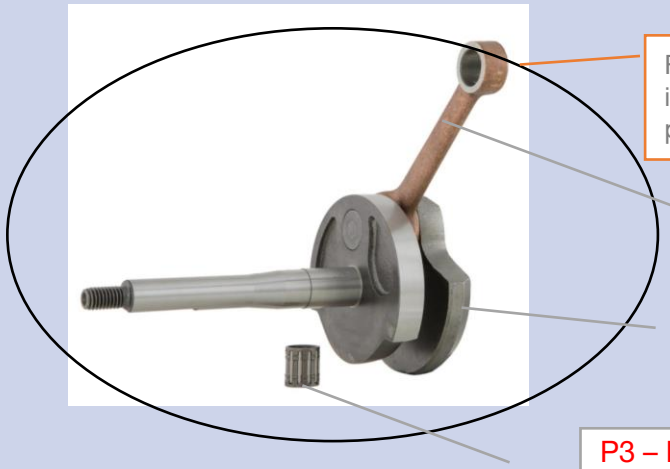


Figura 10 - SET A – Kit cambota; item encomendado com data pretendida de entrega

P1 – Biela; fabricada para stock

P2 – Cambota; fabricada por encomenda

P3 – Rolamento; componente adquirido. Em stock.

Se o MRP (1) for executado e calcular que não há quantidade suficiente de P1 em *stock*, ele emite uma nova ordem de produção de P1 para produzir o mais rápido possível, antecedendo assim a ordem de produção P2.

- Qual deve ser a data e hora de entrega (conclusão da produção) da ordem de produção P1 (componente)?
- Como lidar com vários pedidos de produção de componentes simultâneos com data de entrega não definida?

# 3. PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO
## APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

### Cenário 2 Solução esquemática – datas de entrega operacionais

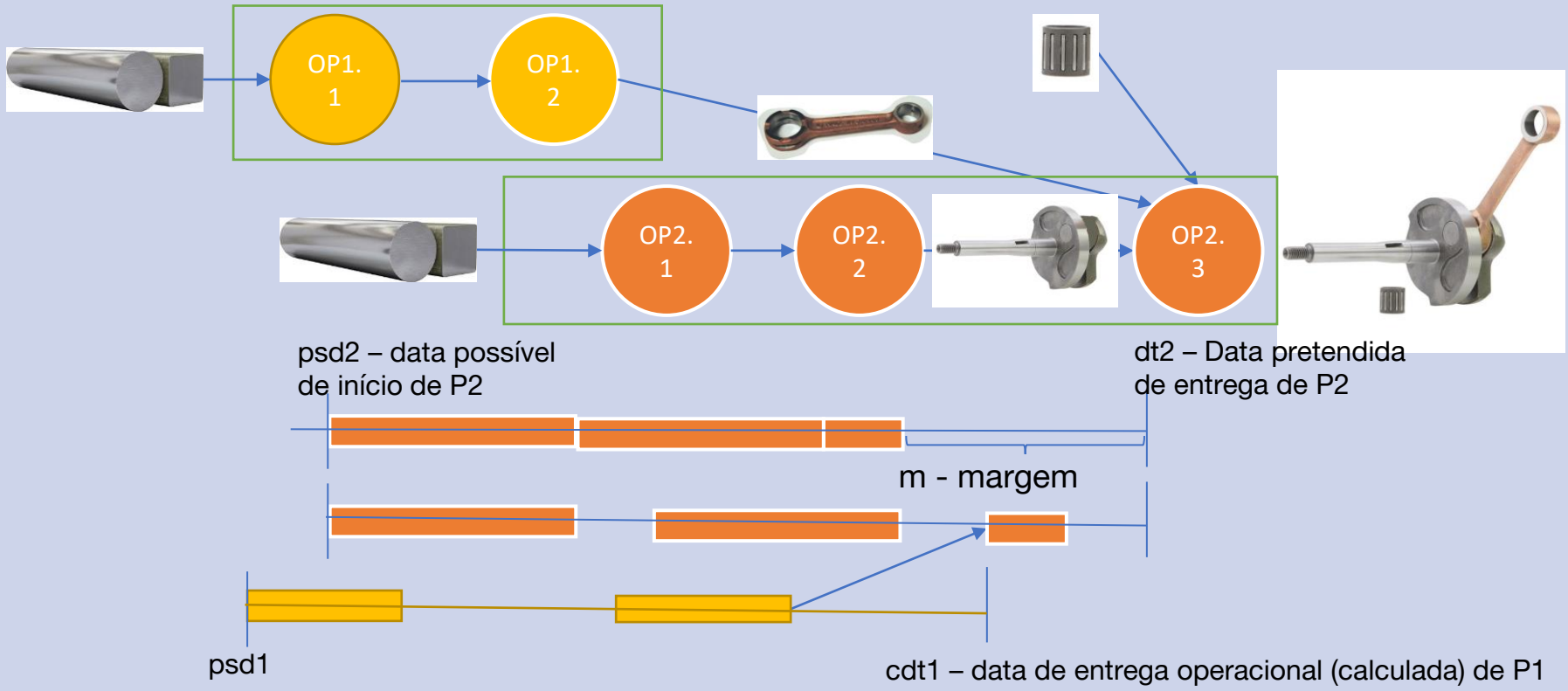



Figura 11 – Operações de fabrico das peças e respetivos tempos de entrega (© INESC TEC).

**Descrição**: P1 começa a ser fabricada previamente (psd1), de forma a estar pronta para montagem pouco depois da conclusão da produção de P2 (OP2.2), de forma à operação final (OP2.3) estar concluída antes da data pretendida para entrega (dt2). A margem 'm' representa a folga temporal máxima que existe para o tempo entre as operações a considerar no escalonamento, ou seja, a diferença entre a data de início e de entrega e a duração total do trabalho da operação 2.

# 3.
# PLANEAMENTO E ESCALONAMENTO DA PRODUÇÃO
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Planeamento e Escalonamento Integrados**

Exemplo: *Decathlon Injection Planning tool & Blue Supply*

Neste exemplo, é necessária a previsão de procura e fabrico de calçado injetado. Para tal, recorrer-se à utilização da previsão de procura de produtos nas lojas e da capacidade de produção de subcontratados de fabrico de calçado para obter soluções otimizadas de planeamento e escalonamento que evitem roturas no fornecimento às lojas e minimizem os custos de produção. Este artigo é relativo ao planeamento e escalonamento de máquinas de moldagem por injeção no calçado para um horizonte temporal longo.

**Escalonamento da produção considerando a eficiência energética**

Exemplo: Produção de filme de plástico extrudido para a indústria alimentar

Problema: Qual a melhor alocação e sequência das ordens de produção para um conjunto de linhas de extrusão e micronização que assegura entregas dentro do prazo e simultaneamente minimiza os custos de produção?

Contexto: As temperaturas ideais de extrusão para cada uma das camadas variam de acordo com a estrutura do produto. Os *setpoints* de temperatura podem variar até 15ºC, dependendo, por exemplo, da espessura da camada.

Portanto, há a necessidade de aumentar ou diminuir rapidamente essas temperaturas conforme a estrutura, o que requer **energia**. Antes do projeto, o escalonamento procurava soluções que minimizassem a soma dos tempos de mudança nas extrusoras, procurando otimizar a sequência de estruturas, espessuras e larguras do filme em produção, não considerando as penalidades associadas às mudanças de *setpoints* de temperatura, nem a minimização geral dos tempos de mudança considerando extrusora, impressora e máquina de corte. Desta forma, foi necessário relacionar o **consumo de energia** com características da máquina e dos produtos, bem como com os estados de funcionamento das extrusoras.

**Solução**:

- Derivar conhecimento da análise dos dados
- Construir matriz de penalidades de energia associada à mudança de setpoints de temperatura
- Escolher uma sequência de produtos na extrusora considerando a estrutura, largura e espessura do filme e, em caso de empate, escolher a sequência que minimiza a penalidade energética

**Resultado**: dezenas de milhares de euros em poupança de energia por ano (para três extrusoras de filme multicamada).

Associação
Portuguesa de
Fundição

# 4.

# SIMULAÇÃO E DIGITAL TWINS

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 4.
# SIMULAÇÃO E DIGITAL TWINS
# ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

## SIMULAÇÃO – CONCEITO E APLICAÇÕES

É uma técnica que recorre a computadores para replicar a operação de um processo ou sistema na sua globalidade. É usada para analisar sistemas estocásticos que operam continuamente, para prever a probabilidade de certos eventos (ex. stockouts numa cadeia de abastecimento, tempo de falha de uma máquina). O computador gera aleatoriamente e grava a ocorrência dos diversos eventos que guiam o sistema, como se ele estivesse a operar fisicamente, simulando intervalos de tempo longos numa questão de segundos. Existem várias aplicações comuns das simulações na gestão industrial e de serviços:

- **Gestão de stocks** (desenho de cadeias de abastecimento e de políticas de gestão de inventário);
- **Desenho e operação de sistemas de manufatura** (tendo em conta falhas e avarias das máquinas, itens com defeito que precisam de retrabalho, etc.);
- **Desenho e operação de sistemas de filas** (ex.: restaurantes, hospitais, etc.);
- **Análise de risco financeiro** (análise de investimento de capital com *cash-flows* futuros incertos).

Um modelo de simulação assume abstração, sendo este sempre menos complexo que o sistema original. Depois ou durante a construção do modelo, pode-se começar a explorar e a compreender a estrutura e comportamento do nosso sistema, testar como ele se vai comportar sob uma variedade de condições, otimizar as soluções e mapeá-las no mundo real.

Existem muitos tipos de **modelos de simulação**, desde folhas de Excel para modelar balanços financeiros até ferramentas complexas de simulação que ajudam utilizadores especializados a explorar sistemas dinâmicos como mercados de consumidores ou sistemas de manufatura.

Os modelos de simulação têm várias vantagens:

- Analisar os sistemas e encontrar soluções onde métodos como cálculos analíticos e programação linear falham;
- A sua estrutura reflete naturalmente a estrutura do sistema;
- Permitem medir valores e rastrear itens que passam no sistema;
- Habilidade de animar o sistema de forma gráfica e verificar o comportamento ao longo do tempo.

No entanto, quando a quantidade de cenários a testar é muito grande, é impossível o uso da simulação para avaliá-los. Assim, devem-se utilizar **ferramentas de otimização** para obter um conjunto de **cenários otimizados** antes da corrida da simulação, reduzindo os cenários a testar para um **subconjunto de possíveis boas soluções**.

# 4.
# SIMULAÇÃO E DIGITAL TWINS
# ENQUADRAMENTO

Há duas principais estratégias para resolver os problemas de otimização: **métodos exatos e métodos aproximados.** Os **métodos exatos** utilizam modelos matemáticos de programação linear para obter a solução ótima para o problema, ainda que esta possa demorar um espaço de tempo muito grande para ser alcançada. Os **métodos aproximados** utilizam regras e algoritmos desenhados à medida para este problema, que se designam por heurísticas e meta-heurísticas, permitindo obter boas soluções num relativo curto espaço de tempo, embora a solução ótima não seja garantida. O Anexo I apresenta um exemplo de otimização de alocação de recursos.

## DIGITAL TWINS

Apesar da definição não ser aceite transversalmente, um **Digital Twin** é uma réplica digital de um sistema real. Na sua origem, o Digital Twin aplicava-se a produtos, sendo que o estado-da-arte atual também inclui processos. Os dados são transmitidos em tempo-real entre o sistema real e digital para garantir que ambos apresentam a mesma informação e o mesmo estado do sistema em cada instante. Desta forma, os Digital Twins assumem um grande potencial no contexto da eficiência da gestão e produção industrial.

Um "digital model" é uma representação digital sem troca de dados automática. Uma mudança no sistema físico não tem efeito direto no sistema digital (ex.modelos de simulação).

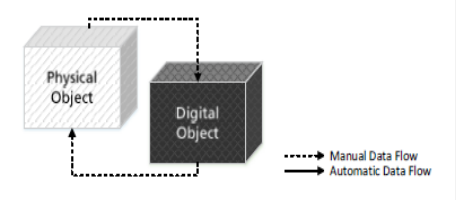



Figura 12 – Representação de um digital model [4].

No caso de um "digital shadow", existe troca de dados automática no sentido físico->digital. Uma mudança no sistema físico tem efeito no digital, mas não o contrário (ex: SCADA)

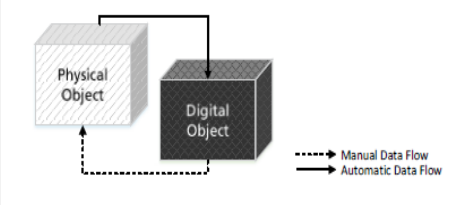



Figura 13 – Representação de um digital shadow [4].

No caso de um "digital twin", os sistemas físico e digital estão completamente integrados num fluxo automático de dados. O sistema digital pode controlar o físico. Uma mudança no sistema físico tem efeito no digital e vice-versa.

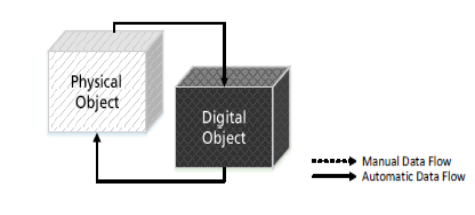



Figura 14 – Representação de um digital twin [4].

# 4.
# SIMULAÇÃO E DIGITAL TWINS
# ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

**GANHOS DOS DIGITAL TWINS:**

- Redução de paragens dos recursos
- Aumento da produtividade e da qualidade
- Redução de custos
- Garantia de segurança na operação

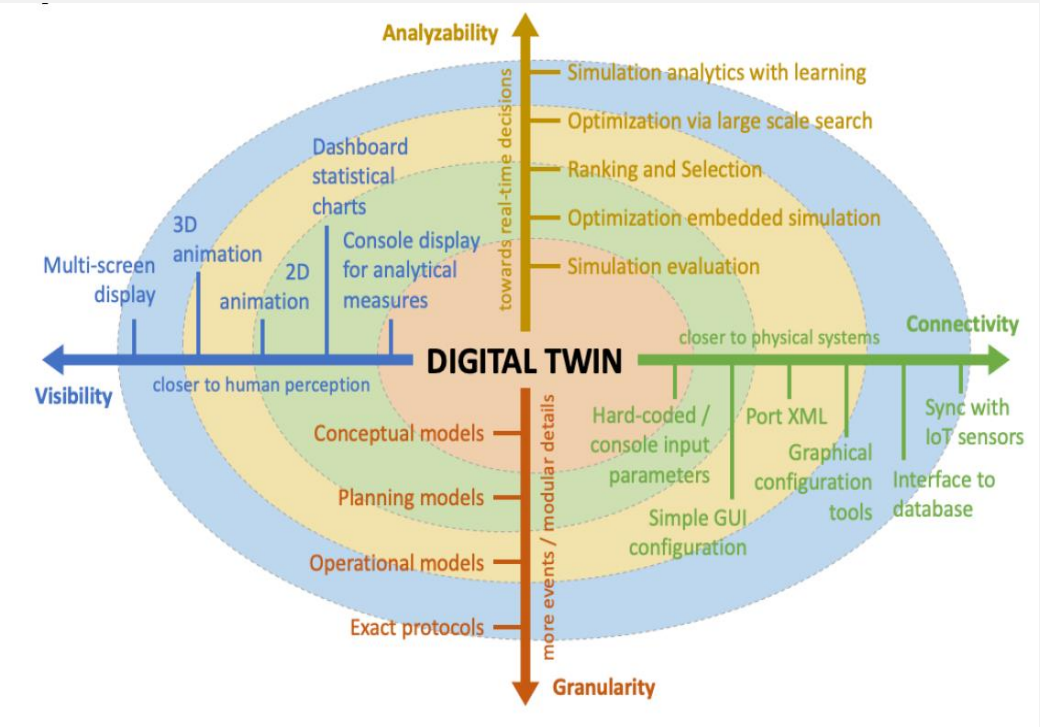
**AS 4 DIMENSÕES DOS DIGITAL TWINS:**

Conectividade
Nível de comunicação com a contraparte física

Visibilidade
Facilidade de perceção para o humano

Granularidade
Nível de detalhe do modelo, que nos pode ajudar a observar cenários futuros com diferentes graus de fiabilidade

Analisabilidade
Como é que pode ser usado para apoiar a tomada de decisão (ex: simulação-otimização que pode apoiar o planeamento de produção, ferramenta analítica para determinar quando efetuar manutenção preditiva)




*Four dimensions for DT capability (Shao et al., 2019)*

Figura 15 – As quatro dimensões dos digital model (© INESC TEC).

# 4.
# SIMULAÇÃO E DIGITAL TWINS
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

O exemplo em causa representa a simulação de uma linha de produção de asas de aviões. No esquema ao lado podemos ver a ilustração do número de estações (working stations – WS) e os operadores humanos e *robots* (fixos e partilhados), associados a cada estação.
Desta forma, pretende-se fazer a **integração otimização-simulação** desta linha de fabrico, considerando os seguintes aspetos:

### Otimização
calcula o número mínimo de estações; aloca operadores e tarefas às estações e determina alocação dos operadores às tarefas.

### Simulação
Representa o sistema com detalhe e tendo em conta as suas caraterísticas; carrega estado atual do sistema para prever comportamento futuro e permite analisar cenários para além dos obtidos pela otimização (partilha de recursos e realocação, tempos de processamento de tarefas não-determinísticos).

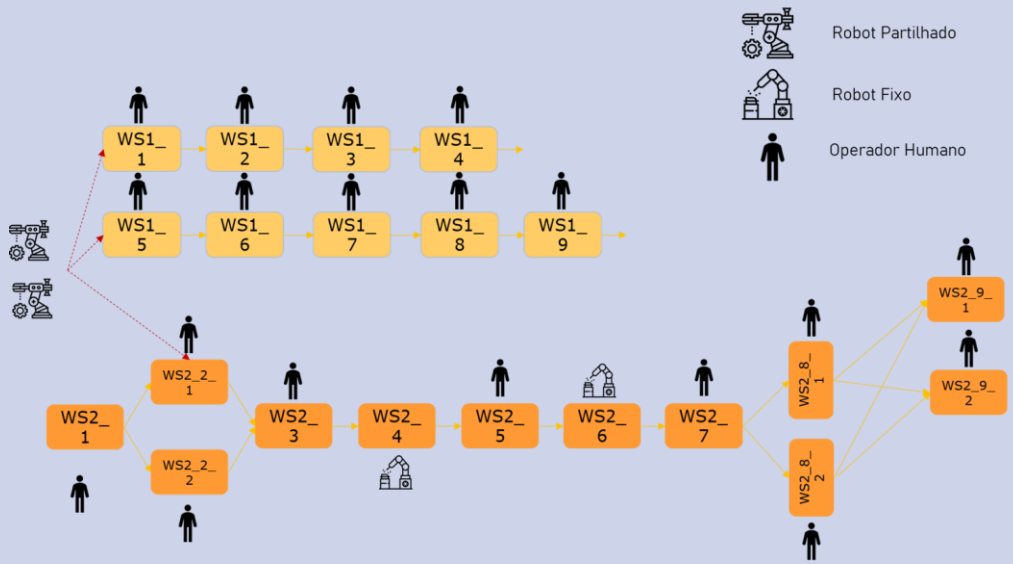



Figura 15 – Esquema da linha de produção de asas de aviões (© INESC TEC).

As soluções de otimização-simulação levaram ao aumento do nº de ordens de produção e à redução do tempo de ciclo de forma agregada, conseguido principalmente através das melhorias na linha 2.

**Sem realocação**

| Linha | Nº de Ordens de Produção | Tempo de ciclo (minutos) |
|---|---|---|
| 1.1 | 2577 | 17,18 |
| 1.2 | 63 | 679,60 |
| 2 | 96 | 465,00 |

**Com realocação**

| Linha | Nº de Ordens de Produção | Tempo de ciclo (minutos) |
|---|---|---|
| 1.1 | 2577 | 17,21 |
| 1.2 | 63 | 679,55 |
| 2 | 102 | 437,65 |

# 4.
# SIMULAÇÃO E DIGITAL TWINS
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

## Linha de Produção de Calçado Injetado

O exemplo em causa representa a simulação de uma linha de produção de calçado injetado. Nela, devem-se considerar os seguintes aspetos:

- O principal objetivo do gestor da linha de produção é **otimizar o planeamento da máquina de injeção;**
- Máquina de injeção rotativa com ***setups* e *changeovers;***
- Planeamento da máquina está associado à **troca de moldes** que depende do tamanho, modelo, cor;
- Existe um número limitado de moldes.

Otimização

- Esta é feita através de um modelo de programação linear que determina um conjunto de planos otimizados a serem avaliados em ambiente estocástico (aleatório).

Simulação

- Representa o sistema com detalhe e tendo em conta as suas caraterísticas
- Permite analisar cenários para além dos obtidos pela otimização (tempos de processamento de tarefas não-determinísticos, paragens da máquina com base em dados históricos).
- Permite obter indicadores de performance próximos da realidade

Associação
Portuguesa de
Fundição

# 5.

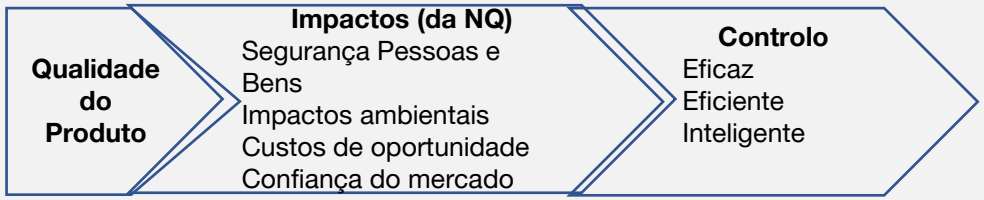
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# ENQUADRAMENTO

A problemática da **qualidade** e do seu efetivo e eficiente **controlo** assume uma importância determinante para o setor da metalurgia/metalomecânica da precisão e com impacto multifacetado a vários níveis:

- **Segurança de pessoas e bens**, resultante de eventuais acidentes provocados por falhas de produtos não conformes (PNC);
- **Impactos ambientais**, resultantes dos desperdícios de matérias-primas, componentes e energia consumidos na produção de PNC;
- **Custos de oportunidade**, resultantes da capacidade produtiva desperdiçada na reposição dos PNC;
- **Diminuição da confiança do mercado e de parceiros** da cadeia de valor, ou mesmo penalizações financeiras, resultantes de falhas no Controlo da Qualidade e consequente fornecimento de peças não conformes (PNC);




Qualquer processo produtivo, por mais bem desenhado e mantido que seja, tem sempre um nível de variabilidade natural próprio, decorrente de **causas comuns**. Para além destas, poderão existir outras **causas especiais**, e normalmente decorrentes de três fontes principais: **equipamentos desajustados ou indevidamente controlados, erros de operadores ou deficiências de materiais**.

Para avaliar o grau de variabilidade, Walter Shewhart desenvolveu um **conjunto de instrumentos** e **cartas de controlo** que, juntamente com **histogramas**, **diagramas de Pareto**, **diagramas de causa-efeitos**, **gráficos de dispersão** e **folhas de verificação** constituem as **sete ferramentas tradicionais do Controlo da Qualidade (CdQ)**.

Para que um processo produza produtos conformes é necessário assegurar que está sob **controlo estatístico**, i.e., não apresente causas especiais e é capaz de assegurar as especificações do produto.

As **cartas de controlo** são representações gráficas de séries de **características da qualidade** medidas ou calculadas. As caraterísticas podem ser dos tipos **variáveis** (e.g. medida do diâmetro de um furo) ou **atributos** (e.g. passa | não passa). Em função dos diferentes tipos de caraterísticas e da forma como são medidas aplicam-se diferentes cartas (e.g. xBAR-R; xBAR-S; I-MR para varáveis, np; p; c; u para atributos).

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# ENQUADRAMENTO

Para assegurar as especificações recorre-se à **avaliação da Capacidade do Processo**, também por técnicas estatísticas, complementado as cartas de controlo com **análises de distribuição e cálculo de índices da capacidade** (e.g. Cp, Cpk, Pp, Ppk, etc.)

O **cálculo de medidas estatísticas** do controlo da qualidade (**CdQ**) implica a realização de **medições** dos produtos fabricados. As medições podem ser efetuadas à **totalidade produzida** ou apenas a parte dela. O **CdQ** sobre a totalidade das unidades produzidas pode ser impossível, caso implique ensaios destrutivos, ou economicamente inviável, pelo que frequentemente se recorre a **técnicas de amostragem**, em que um número de unidades representativas da produção é selecionado para realização das medições.

A **determinação da amostra** é em si uma dificuldade se se quiser ter em consideração combinações das caraterísticas dos produtos e dos processos, pois assume uma dinâmica complexa de determinar em tempo útil para a tomada de decisão.

As **técnicas tradicionais de CEP** podem ser consideradas como razoavelmente satisfatórias no respeitante à descrição das Não Conformidades (NC-não atendimento de requisitos pré-estabelecido) e na explicação de algumas das suas causas, nomeadamente as relacionadas com a instabilidade do processo.

No entanto, têm **dificuldade em explicar razões de causalidade complexas** e que envolvam vários fatores simultâneos, bem como reduzida capacidade de prever o que poderá acontecer. A sua capacidade de **antecipação problemas futuros** (estimação ou previsão) é ainda menor.

**Abordagem - Qualidade 4.0: Visão do Panorama Geral**

A disponibilização de tecnologias Indústria 4.0, em particular no respeitante à aquisição e processamento de um número muito significativo de dados ofereceu grandes oportunidades para a criação de um **novo paradigma para o Controlo da Qualidade (CdQ).**

A partir de dados e factos, a abordagem metodológica à **Qualidade 4.0** (Q4.0) deve ter por base um conhecimento detalhado do processo e do produto que permita a identificação dos fatores que influenciam a ocorrência de **Não Conformidades.** De seguida, deve existir um enfoque nos que evidenciam maior impacte, compreendendo as suas relações, especialmente as de Causalidade. Importa ter em conta que a maioria das ocorrências terão causas ocultas, que poderão ser justificadas por dados relacionados.

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

## Q4.0 E O CICLO DE VIDA DO PRODUTO

A Q4.0 é feita através de Sistemas de Apoio à Decisão no Controlo da Qualidade, com capacidades Preditivas e Prescritivas (SADCoPQ), de modo totalmente integrado com o sistema de produção e o ecossistema de informação. O controlo de Qualidade 4.0 deve cobrir todo o ciclo de vida dos produtos, desde a conceção à utilização:

Figura 16 – Ciclo de vida dos produtos (© INESC TEC).

**01.Conceção e Desenvolvimento**
Processos e tecnologias adequados, operações/materiais/ferramentas a utilizar, competências dos operadores.

**02.Preparação e Planeamento**
Características a controlar, meios de controlo, dimensão das amostras e frequência da amostragem.

**03.Fabrico e Controlo da Qualidade**
Aquisição automatizada de dados da produção; monitorização e controlo do chão de fábrica prestando apoio aos operadores, em tempo quase real, através de múltiplas vistas sobre os dados adquiridos, alarmes, previsões e recomendações; acompanhamento em *backoffice,* fazendo a análise em diferido através das sete ferramentas da qualidade.

**04.Integração com a Cadeia de Valor**
Obtenção de informação relevante dos fornecedores de materiais (ex. sobre o lote) e dos integradores dos produtos (ex. certificados controlo da qualidade do lote/peça).

**05.Utilização**
Obtenção de informação relevante na utilização e manutenção do produto (ex. problemas).

## Sindicação de Fontes de Dados

A sindicação de dados passa pela interligação dinâmica, numa lógica IoT, de várias fontes de dados: dados de engenharia (sistemas legados ERP-CAD-PLM), dados da operação (sistemas legados MÊS-MOA), dados de controlo (sistemas fabrico CNC), dados de processo (sensores), como está ilustrado no esquema seguinte. Nele, apresentam-se exemplos das fontes de dados elencadas, a frequência temporal para a sua obtenção e, como consequência, o volume de dados que representa. Naturalmente, uma maior frequência na recolha de dados resulta num volume maior de dados a analisar.

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

| | DADOS ENGENHARIA (SISTEMAS LEGADOS ERP-CAD-PLM) | DADOS OPERAÇÃO (SISTEMAS LEGADOS MES-MOA) | DADOS CONTROLO (SISTEMAS FABRICO CNC) | DADOS PROCESSO (SENSORES) |
|---|---|---|---|---|
| | SKU<br>DESENHOS TÉCNICOS<br>BOM<br>GAMA OPERATÓRIA<br>INSTRUÇÕES DE TRABALHO<br>PIEs<br>• ID CARACTERÍSTICA<br>• TIPO DE CARACTERÍSTICA<br>• FREQUÊNCIA E DIMENSÃO AMOSTRAIS<br>• MEIOS DE CONTROLO | **TRANSACIONAIS**<br>TIMESTAMP<br>• Ofs<br>• Início, interrupções, fim<br>• Lotes de Material<br>• Recursos de Produção<br>  • Máquinas<br>  • Operadores<br>  • Ferramentas<br>• NC ocorridas<br>  • Tipo<br>  • Causas prováveis | **TIMESERIES**<br>TIMESTAMP<br>• PROGRAMA EM EXECUÇÃO<br>• LINHA EM EXECUÇÃO<br>• VALORES VARIÁVEIS<br>  • FERRAMENTA<br>  • VELOCIDADE<br>  • PRESSÃO<br>  • BINÁRIO<br>  • POSIÇÃO<br>  • TEMPERATURA | **TIMESERIES**<br>TIMESTAMP<br>• ID<br>• VALOR<br>• UNIDADE |
| **Frequência** | **DIA** | **MINUTO** | **DÉCIMAS SEGUNDO** | **MILISEGUNDOS** |
| **Volume de Dados** | Baixo | Médio volume | Alto volume | Muito alto |

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
## ENQUADRAMENTO

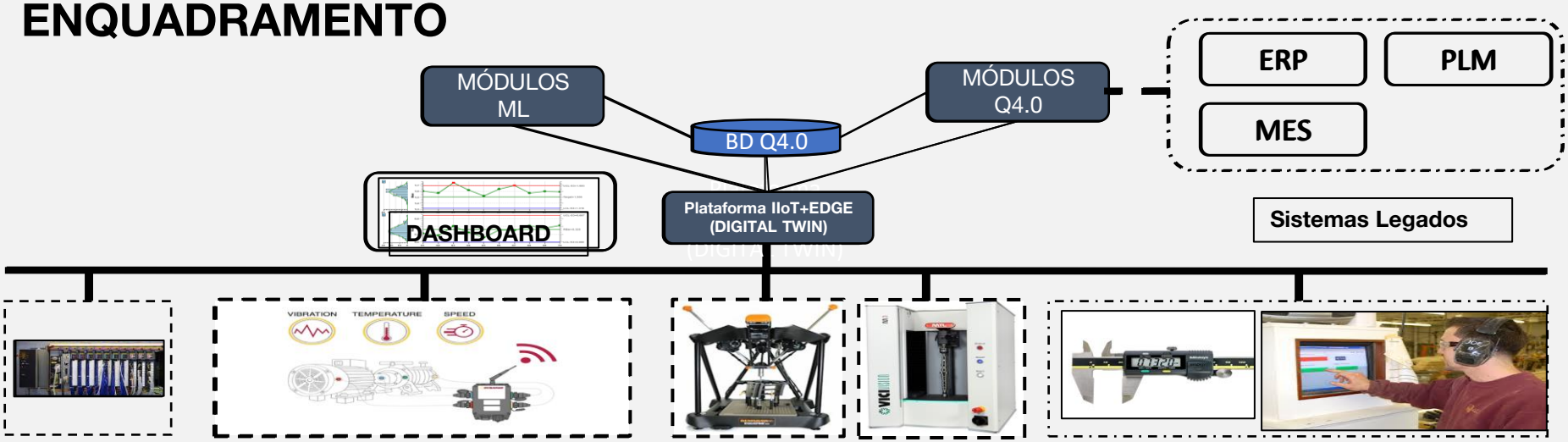



Figura 17 – Esquema da Arquitetura SADCoP (© INESC TEC).

Figura 18 – Módulos SADCoP (© INESC TEC).

A **arquitetura do SADCoPQ** utiliza Modelos de Previsão de Não Conformidades, recorrendo a ferramentas computacionais e de análise estatística como:

- Regressão Logística Binária
- Árvores de Decisão (e Random Forest)
- Redes Neuronais (Inteligência Artificial (única camada), Deep Learning (multi-camada))

Relativamente à natureza dos dados utilizados, estes podem ser:

- Transacionais (ferramentas, operadores, lotes materiais, limites e outras regras de CEP)
- Streaming (velocidade rotação, binário e corrente motor, vibração, ruído, temperatura, etc.)

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# APLICAÇÕES

Apresenta-se agora um exemplo de aplicação dos SADCoPQ a uma **caso de estudo numa empresa metalomecânica,** dividido em três partes:

**Produto** / Processo Produtivo / Solução

**Caraterísticas do Produto:** Peça mecanizada a partir de uma peça de aço, forjada - aplicação no setor veículos pesados

- Peso aproximado: 17 Kg
- Dimensões aproximadas: 60 cm x 15 cm
- Quantidades a produzir
- Cerca de 450 pç/dia
- 100.000 pç/ano
- 5 dias x 24 horas
- Fornecimento ao bordo de linha montagem
- Nível qualidade
- Zero defeitos

<u>Aspetos a considerar</u>

1. **Planos de Inspeção e Ensaio no Fabrico** – cada versão de cada peça tem o seu plano de inspeção e ensaio
   1. Define as caraterísticas a controlar (classe da caraterística: variável ou atributo)
   2. Respetivos atributos (limites de especificação)
   3. Meios de controlo a utilizar (manuais e automáticos)
   4. Forma e Frequência de amostragem

**2. Amostragem** – define a frequência e a dimensão da amostra para realização do controlo das caraterísticas

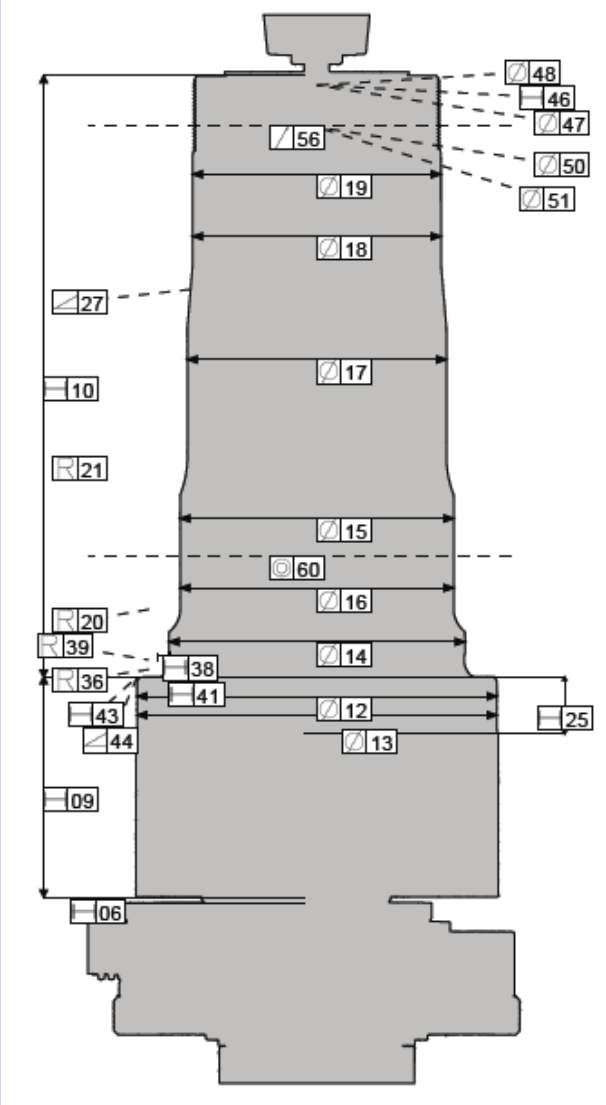



Figura 19 - Peça mecanizada a partir de uma peça de aço, forjada [6].

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# APLICAÇÕES

Produto / **Processo Produtivo** / Solução

**Processo Produtivo > Célula de produção dedicada**

- Dois robots de movimentação (E, J)
- Dois equipamentos de corte (F1, F2)
- Três equipamentos CNC de maquinação (L1, L2, L3)
- Dois equipamentos de Controlo Dimensional automáticos
  - VICI-VISION (Q)
  - EQUATOR (R)
- Outros Equipamentos de Controlo
  - Manuais (micrómetro, paquímetro, passa-não passa)
  - Magniflux (U)

Figura 20 – Célula de produção dedicada (© JASIL).

À direita, apresenta-se o esquema do processo produtivo, no qual é monitorizada a condição de vibração da máquina. O movimento mecânico de cada componente é transmitido ao quadro de ferramentas e transduzido (transformado noutra forma de energia) por um sensor único colocado na parte exterior da máquina para a sua monitorização. A solução é não-invasiva, sendo apenas necessário um sensor único. O método é independente da arquitetura interna da máquina e retorna uma série de dados que permitem obter uma imagem holística que codifica a condição do sistema.

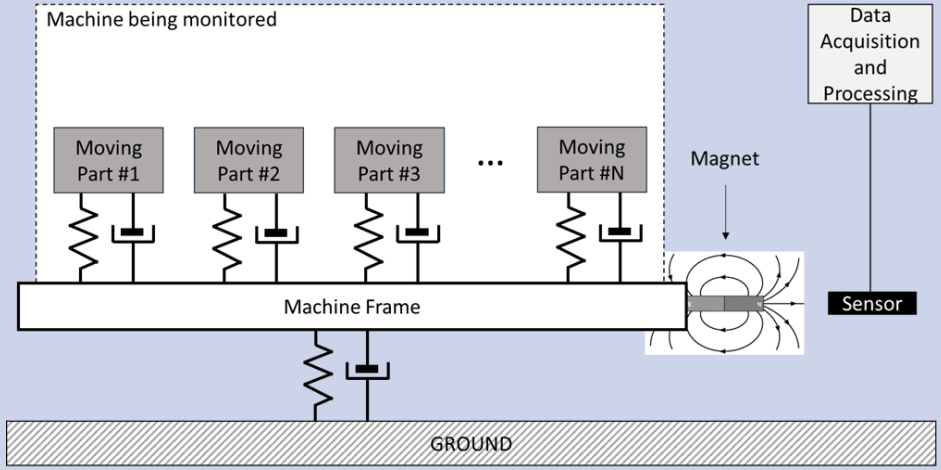



Figura 21 – Esquema da monitorização do processo produtivo (© INL).

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

## Produto / Processo Produtivo / **Solução**

Como resultado da monitorização da máquina baseada na sua vibração, uma série de ferramentas de eletrónica, inteligência artificial e interface com o utilizador permitem obter um conjunto de dados e a sua respetiva análise, permitindo várias perspetivas sequenciais:

**Descritiva →Diagnóstico → Preditiva → Prescritiva:**

A **perspetiva descritiva** é a apresentação inicial de dados relativamente a testes de normalidade, médias, momentos e distribuição das frequências (histogramas). Nesta fase permite identificar não-conformidades (NC) e tentar inferir a partir dos dados causas prováveis (CP). Um exemplo dos benefícios que estas análises podem trazer é a figura seguinte, que ilustra a frequência das pastilhas partidas (a verde) e trocas de pastilha (a azul) nas linhas 56 e 57. Podemos ver que, na linha 56, a capacidade de previsão da quebra das pastilhas permite trocá-la antes do evento, e como tal, evitar que estas quebrem.

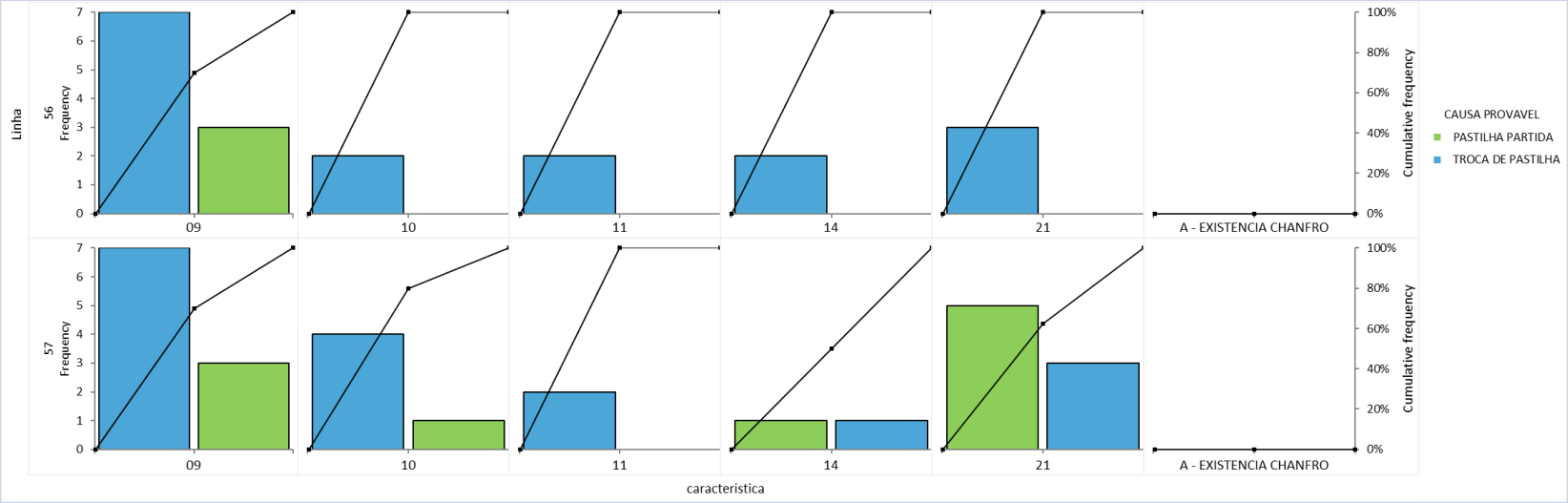



Figura 22 – Melhoria do Procedimento de Troca de Pastilha (previsão da quebra da pastilha (© INESC TEC).

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Perspetiva Diagnóstico:** a análise dos dados permite identificar *outliers,* reconhecer padrões e antecipar problemas. Isso pode ser conseguido olhando para a carta de controlo I-MR (individual-amplitudes móveis), relativa a uma caraterística da linha 57.

NC&CP

EVENTO NOTÁVEL

ALARMES VIOLAÇÃO REGRAS CONTROLO

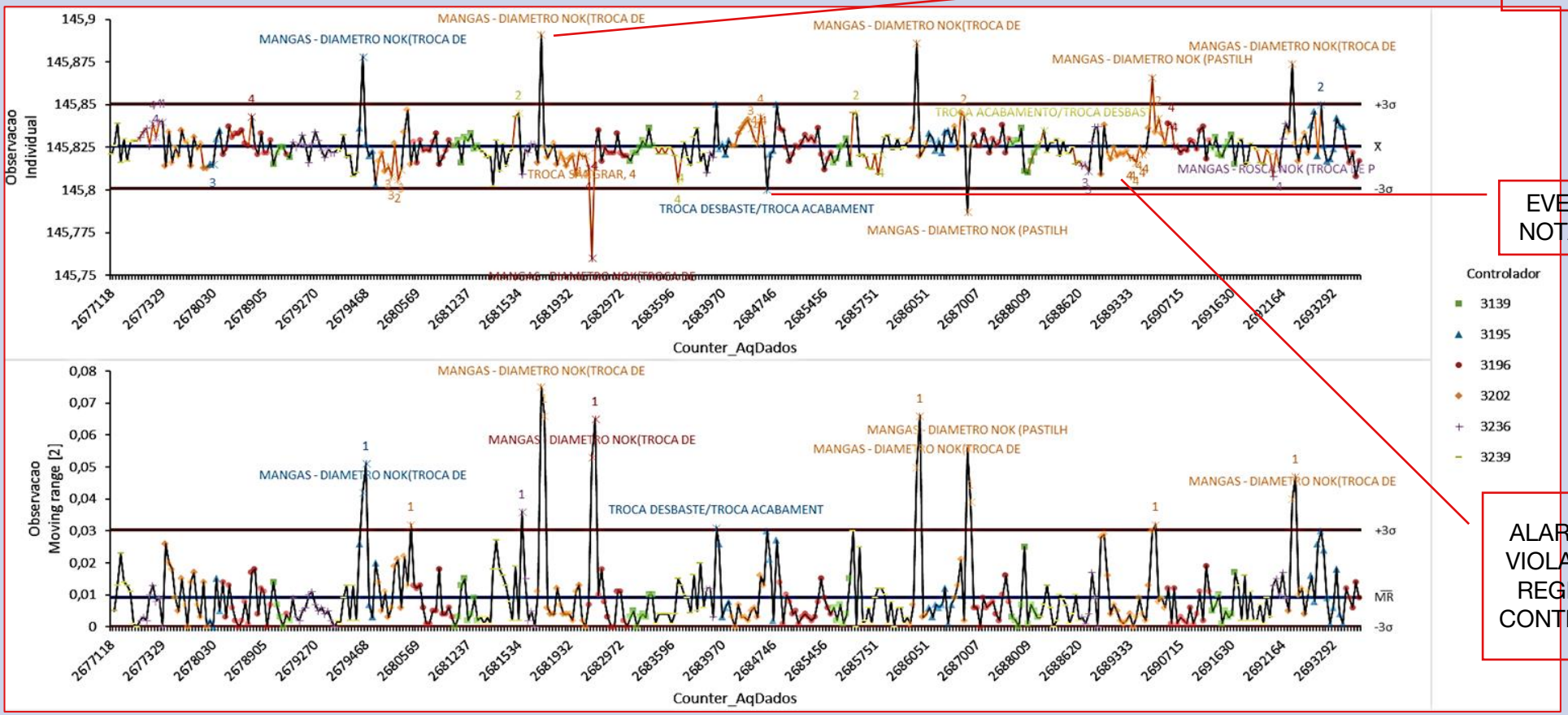


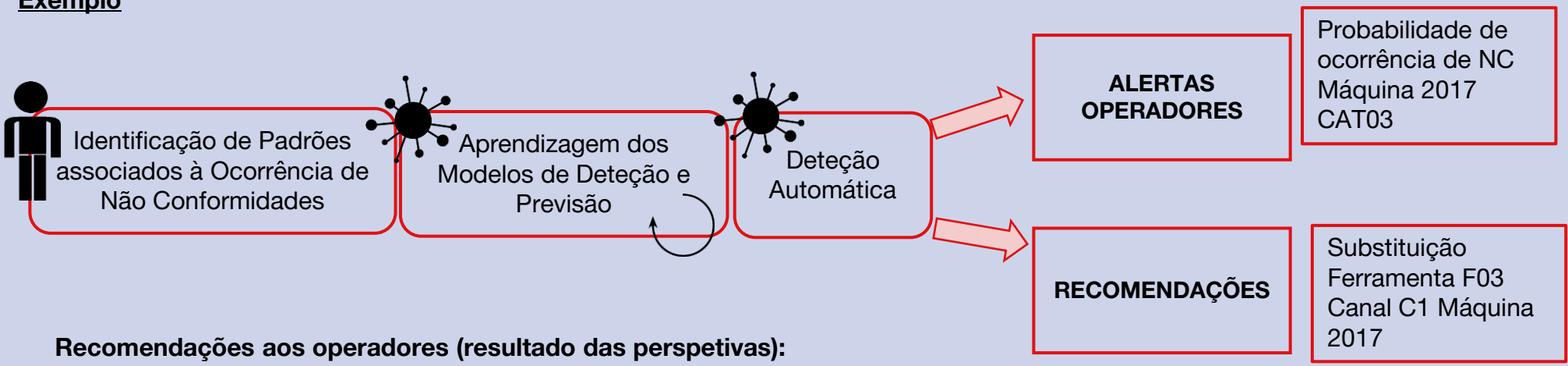

Figura 23 - Característica 09 da Carta de controlo I-MR da Linha 57. [6]

# 5.
# CONTROLO DE QUALIDADE 4.0
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Perspetiva Preditiva e prescritiva:** esta perspetiva entra na fase em que a análise de dados e reconhecimento de padrões permite prever potenciais problemas e os seus *timings*. Para tal, são usadas ferramentas de Machine Learning, aplicando várias técnicas avançadas, como a regressão logística binária, árvores de Decisão (e *Random Forest*) e Redes Neuronais (seja Inteligência Artificial (única camada) ou Deep Learning (multi-camada).

**Exemplo**




**Recomendações aos operadores (resultado das perspetivas):**

- Afinações das máquinas para compensar desgaste natural das ferramentas;
- Sugestão de mudança de ferramenta, antecipando:
  - Não Conformidades dimensionais
  - Quebra de Ferramentas
- Recomendações aos desenvolvedores de produtos e processos
  - Processos e equipamento que reduzam riscos de ocorrência de não conformidades

Associação
Portuguesa de
Fundição

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 6.

# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# ENQUADRAMENTO

## DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA — ENQUADRAMENTO

No âmbito da União Europeia, aplicam-se vários planos políticos a todos os Estados-Membros que incidem sobre questões de eficiência energética na Indústria, tais como:

- Plano Nacional integrado de Energia e Clima (PNEC 2021-2030) – de âmbito nacional
- Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC2050)
- Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)
- Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*)
- Fit for 55
- REPowerEU

O setor da indústria, que hoje representa cerca de **11% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE)**, é tradicionalmente pró-ativo na adoção de tecnologias inovadoras que potenciem a redução dos custos operacionais, nomeadamente pela via da redução do consumo energético.

Figura 24 – Planos políticos nacionais e da UE para a transição energética.

Os principais *drivers* de descarbonização do setor da indústria são:

- A eficiência energética e de recursos;
- A eletrificação;
- A energia solar térmica e a biomassa;
- A inovação e novos modelos de negócio (ex. biorefinarias);
- Simbioses industriais e reaproveitamento de recursos;
- A captura e armazenamento de carbono (CCS) é uma opção relevante na descarbonização do sistema energético.

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

## Eficiência Energética no Setor da Fundição

### Enquadramento

Existe uma grande procura global de calor na indústria, nomeadamente por temperaturas muito elevadas. Em 2014, 32% do consumo final de energia era proveniente da indústria, sendo que 74% se realizava sob a forma de calor e o restante de eletricidade [7]. Entre esta procura de calor, 48% correspondia a temperaturas superiores a 400 ºC, incidindo em processos de transformação de materiais [7].

Nos últimos anos, tem-se assistido na indústria (quer na intensiva quer na não-intensiva em energia) a um aumento da procura por calor, principalmente nas temperaturas mais elevados, sendo que se perspetiva que esta tendência se mantenha nas próximas décadas.

Na indústria, existem grandes quantidades de energia térmica desperdiçada sendo de assinalar, no contexto da fundição, as perdas de energia térmica nas atividades de produção de ferro e aço, nos metais fabricados, no equipamento de transporte, no alumínio e nas próprias fundições. Estes desperdícios levam ao aumento no consumo de energia (kWh), das emissões de GEE ($CO_2$e) a um aumento do custo da energia (€).

O setor industrial detém 25% da energia final da UE-27 e Reino Unido. Em Portugal, chega aos 31%, sendo 2⁄3 sob a forma de calor [8]. Uma parte significativa (20 a 50%) é perdida como calor residual: gases de exaustão, água e ar de arrefecimento, condensados, perdas térmicas por mal isolamento ou pelos produtos, etc. A UE tem um potencial significativo de recuperação de calor industrial (300 TWh/ano), sendo que 1⁄3 do total envolve temperaturas abaixo dos 200 ºC (ou seja, baixa temperatura) [8]. A recuperação de calor residual e o aproveitamento de energias renováveis são oportunidades atrativas para fornecer energia sem gerar emissões adicionais de GEE e, ao mesmo tempo, reduzir custos operacionais e melhorar a eficiência dos processos. Em função das caraterísticas do calor residual, existem diferentes soluções e tecnologias de aproveitamento. Estas caraterísticas definirão a viabilidade técnica e económica.

### Áreas prioritárias de Intervenção

As principais origens deste desperdício energético representam as áreas de intervenção prioritárias para melhoria da eficiência energética na indústria. A tabela 1 apresenta dados do SGCIE relativos ao Setor Metalúrgico e Metalomecânico, nos quais **o isolamento térmico, a recuperação de calor e os sistemas de combustão e compressão** são identificadas como áreas com elevado potencial de redução global do consumo energético (tep/ano) e de GEE (t$CO_2$e), com aplicação à fundição.

De seguida, serão apresentadas várias medidas de eficiência energética nestas áreas prioritárias, com os consequentes benefícios económicos e ambientais quantificados.

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
## ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

| | Potencial de redução Global (tep/ano) | PRI (anos) | Custo de redução por tep (€/tep) | Redução GEE (t $CO_2$e) | Número de Instalações |
|---|---|---|---|---|---|
| Formação e sensibilização de recursos humanos | 2 222 | 0,35 | 250 | 8 624 | 185 |
| Frio Industrial | 3 495 | 4,83 | 4 936 | 18 894 | 170 |
| Iluminação eficiente | 10 708 | 3,33 | 3 777 | 58 515 | 977 |
| Integração de processos | 1 307 | 2,34 | 1 347 | 4 225 | 23 |
| Isolamentos térmicos | 12 540 | 1,30 | 571 | 34 338 | 512 |
| Manutenção de equipamentos consumidores de energia | 2 594 | 2,24 | 1 693 | 10 234 | 176 |
| Monitorização e controlo | 11 808 | 1,62 | 1 176 | 47 754 | 515 |
| Optimização de motores | 5 963 | 2,38 | 2 433 | 32 428 | 436 |
| Outros | 22 306 | 4,15 | 3 243 | 86 886 | 580 |
| Recuperação de calor | 30 544 | 2,22 | 833 | 78 375 | 362 |
| Sistemas de bombagem | 2 824 | 2,13 | 2 207 | 15 430 | 212 |
| Sistemas de combustão | 14 956 | 2,29 | 1 490 | 64 142 | 375 |
| Sistemas de compressão | 8 891 | 2,16 | 2 302 | 48 240 | 769 |
| Sistemas de ventilação | 3 455 | 1,68 | 1 745 | 18 424 | 266 |
| Transportes | 688 | 3,26 | 3 792 | 1 941 | 39 |
| Tratamento de efluentes | 1 378 | 1,31 | 627 | 4 091 | 16 |
| **Total Geral** | **135 678** | **2,66** | **1 888** | **532 540** | - |

Tabela 1 - Áreas de intervenção prioritária | Dados SGCIE - Setor Metalúrgico e Metalomecânico | © ADENE

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Redução de desperdícios | Isolamentos térmicos**

Embora seja possível efetuar-se cálculos rigorosos para se definirem as espessuras de isolamento técnica e economicamente mais adequadas às várias situações encontradas em instalações a vapor, na prática as espessuras usadas são baseadas em valores práticos de referência (anexo, gráfico 5 e tabela 2). Nas instalações a vapor os únicos equipamentos que não podem ser isolados termicamente são os conjuntos de purga, pois só assim estes dispositivos funcionarão corretamente. Um dos aspetos fundamentais a considerar nas economias de energia térmica são as perdas de calor que se verificam através de componentes não isolados. Pode-se obter uma estimativa das perdas caloríficas através de cálculos de transferência de calor ou então recorrer-se a ábacos ou tabelas que deem imediatamente os valores das perdas caloríficas em função do tamanho nominal da tubagem e do gradiente térmico entre os componentes e o ambiente envolvente (anexo, tabela 3).

**Exemplo**:

Para uma válvula de 1'' não isolada termicamente (anexo X, figura X) - Tválvula = 222,2 ºC | Tválvula = 27,6 ºC (isolada)

- $\Delta T \approx 200$ ºC
- Horas de funcionamento = 8000 h/ano

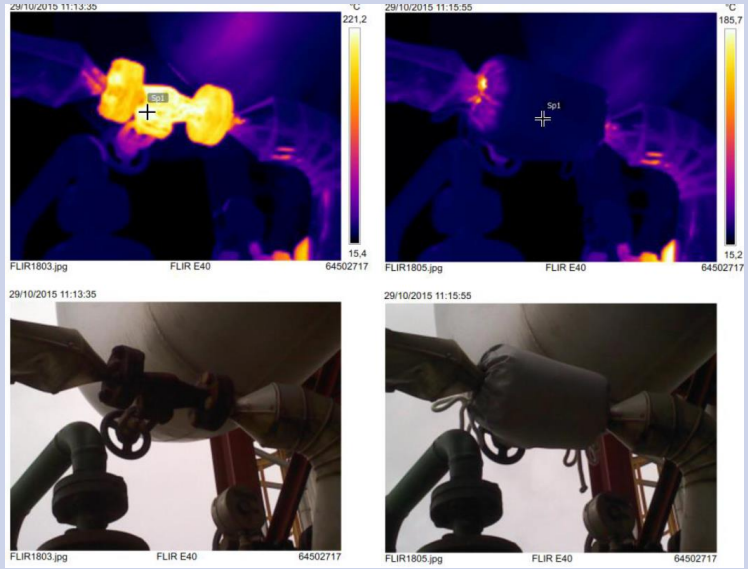



Figura 25 – Imagem naturais e infravermelho de uma válvula isolada e de outra não isolada (© INEGI).

Não isolando os acessórios, corresponde a uma **perda energética** de cerca de 0,75 tep.

A nível **económico**, ao aplicar o isolamento a uma válvula nestas condições, é possível obter as seguintes **poupanças** (dependendo do vetor utilizado):

Poupança Eletricidade = 466 €/ano
Poupança Gás Propano = 835 €/ano
Poupança Gás Natural = 263 €/ano

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# APLICAÇÕES

**Eficiência Energética e Ambiental de Processos | Fornos e Cadinhos**

| ALOCAÇÃO | QUOTAS TÍPICAS |
|---|---|
| Energia útil | 20 – 30 % |
| Perdas pelos gases de exaustão | 25 – 50 % |
| Perdas pela abertura dos fornos | 5 – 10 % |
| Perdas associadas ao arrefecimento | 10 – 15 % |
| Perdas pelas paredes do forno | 10 – 15 % |

Relativamente aos **fornos**, essenciais no setor da fundição, as medidas indicadas para promover a sua eficiência energética e ambiental nos processos industriais são:

- Reduzir as infiltrações de ar e sucessivas perdas térmicas;
- Melhorar o isolamento térmico → materiais refratários ou fibras cerâmicas (p.ex. lã mineral);
- Materiais refratários usados nos fornos → p.ex. SiC (Carboneto de Silício), têm menor densidade do que os refratários comuns e maior resistência térmica;
- Utilizar queimadores mais eficientes como **queimadores recuperativos** e **regenerativos**, ou queimadores de alta velocidade;
- Substituir fornos antigos → capacidade adequada;
- Controlo digitalizado → tempo, temperaturas do processo, consumos e emissões;
- Utilizar a relação ar/combustível ideal;
- Substituição do combustível/vetor energético utilizado (gás natural, biogás, hidrogénio, eletricidade);
- **Aproveitamento do calor residual.** A sua recuperação e aproveitamento poderão ocorrer em várias vertentes:
  - Pré Aquecimento do ar de combustão / Produção de água quente ou vapor / Pré Aquecimento da matéria prima / Produção de energia elétrica - Ciclos Orgânicos de Rankine (CRO) (anexo, figura 27).

Os **cadinhos** (ou colher de vazamento) são normalmente utilizados em fundição, tendo características refratárias e resistentes, no qual são transportados materiais a temperaturas elevadas. Podem ser fabricados em vários tipos de materiais, refratários ou não, metálicos ou cerâmicos.

Medidas de redução do consumo de energia térmica e ecoeficiência:

- Utilização de cadinhos com tampa;
- Isolamento correto e eficiente pelo exterior;
- Optar por cadinhos com uma menor massa de refratário e com materiais mais porosos;
- Recorrer a revestimentos interiores que se deixam molhar pelo metal, de forma a diminuir a quantidade de refugo;
- Pré-aquecimento de cadinhos com equipamentos mais eficientes;
- Inverter os cadinhos de cima para baixo antes do seu aquecimento, de maneira a melhorar a retenção de calor e reduzir a quantidade de combustível necessária;

Figura 26 – Fornos e cadinhos.

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# APLICAÇÕES

**Recuperação e reutilização de calor residual | Fontes Fixas de Emissão e Compressores**

A eficiência dos **chillers de absorção (anexo X, imagem Y)** depende da temperatura do calor e da água de arrefecimento: quanto maior a diferença de temperatura, melhor será a sua eficiência. Este tipo de sistema é especialmente atrativo para indústrias onde existe uma elevada quantidade de **calor residual** e necessidade de algum tipo de arrefecimento.

Uma empresa visitada no âmbito deste projeto possui uma fonte fixa de calor (forno de fusão) com as seguintes caraterísticas:

- Caudal do efluente = 11 338 m3/h
- Temperatura saída do efluente = 198 ºC

**Recuperação de calor**

Potência térmica disponível (110 ºC) = **220 kW**

Sugere-se a instalação de um **chiller de absorção de 200 kW** para aproveitamento do calor residual num sistema de climatização. As poupanças estimadas serão:

- Energia utilizada em climatização [kWh/ano]: 160 711
- Poupanças anuais [€/ano]: 12 857
- Investimento [€]: 62 500
- PRI [anos]: 5

Empresas do sector da fundição possuem compressores de ar comprimido:

- Energia elétrica consumida anual: 328 000 kWh/ano
- Temperatura saída do óleo de lubrificante= 68 ºC

**Recuperação de calor**

Energia térmica disponível (60ºC)
**295 200 kWh**

Sugere-se a instalação de um **sistema de recuperação de calor instalado nos compressores para produção de água quente sanitária (AQS).** As poupanças estimadas serão:

- Energia utilizada em AQS [kWh/ano]: 295 200
- Poupanças anuais [€/ano]: 585,0
- Investimento [€]: 1 500
- PRI [anos]: 2,56

Figura 27 – Chiller de absorção de 200 kW naturais e sistema de recuperação de calor instalado nos compressores.

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Fluxos de Calor Residual | Integração Energética de Processos e Armazenamento de energia térmica**

A **integração energética** permite reduzir o consumo de utilidades exteriores ao processo, aproveitando os excessos entálpicos de correntes quentes para fornecer a correntes com deficiência de energia (ou seja, correntes frias) através de uma **rede de permutadores de calor**. Após a análise de integração, as correntes com estas características deixam de permutar **calor** apenas com utilidades externas e passam a permutar também entre si, reduzindo desta forma o consumo total de energia.

O **armazenamento de energia térmica** é uma tecnologia transversal que contribuirá para a transição do modelo energético por:

- aumentar a participação das **energias renováveis** e de baixo carbono, especialmente em tecnologias solares térmicas, por forma a colmatar as diferenças entre a oferta e procura de energia térmica.
- promover a flexibilidade operacional a **centrais de geração de energia térmica** e a **processos industriais**;
- permitir a **recuperação de calor residual** em processos industriais;
- permitir a estabilização de temperaturas.

Os **sistemas de armazenamento de energia térmica** englobam vários tipos de tecnologias disponíveis e diferentes gamas de temperatura, nas quais se podem inserir algumas aplicações existentes neste setor (baixa/média temperatura). Fundamentalmente, existem três tipos de mecanismos:

**Armazenamento sensível**, no qual a temperatura do material de armazenamento varia com a quantidade de energia armazenada;

**Armazenamento latente**, que utiliza a mudança de fase de um material para armazenar energia;

**Armazenamento termoquímico**, onde se utilizam reações endotérmicas reversíveis como meio de armazenamento.

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Integração de Energias Renováveis | Solar Térmico**

A indústria metalúrgica e metalomecânica é caraterizada por ter processos que envolvem temperaturas de trabalho em geral elevadas para a tecnologia **solar térmica** tipo de tecnologia. Ainda assim, em indústrias deste setor, o calor de origem solar pode ser utilizado para **lavagens, processos de secagem, produção de vapor, banhos de tratamentos ou climatização**. Atualmente em Portugal, existe uma instalação SHIP (*Solar Heat for Industrial Process*) operacional e outra em fase de arranque. Esta instalação está localizada numa indústria metalúrgica para fornecimento de calor para processos de banhos e secagem (temperaturas que variam de 50 ºC a 160 ºC), chegando até 180 ºC na saída dos coletores. A instalação foi projetada para gerar 67 kWt (área total de coletores de 108 m2) através de coletores parabólicos de pequena escala, utilizando para isso óleo térmico como fluido de trabalho. O sistema é hibridizado com um queimador de gás natural. Os consumos prévios à integração e poupanças obtidas após foram:

| Consumos antes da integração | |
|---|---|
| Consumo Propano no Banho | 7 141 kg/ano |
| Consumo Propano na Estufa | 9 043 kg/ano |
| Consumo Propano Túnel | 16 184 kg/ano |
| Custo | 19 955 €/ano |

| Poupanças | |
|---|---|
| Consumo Propano Evitado | 9 232 kg/ano |
| Poupanças Económicas | 11 382 €/ano |
| Emissões CO2 evitadas | 31,5 ton.$CO_2$/ano |
| Diminuição Consumo Propano | 54 % |

Numa instalação SHIP pode-se desenvolver um sistema holístico de integração direta de tecnologias solares térmicas de média temperatura em processos industriais, que implica:

- Otimização eficiência de concentradores solares CPC (produção nacional) e desenvolvimento de sistema anti-estagnação;
- Desenvolvimento de sistema de armazenamento de energia térmica - PCM.

**Principais conclusões:**

- O sistema pode ser replicável numa multiplicidade de setores industriais;
- A implementação destes sistemas potencia a diminuição da fatura energética e da pegada carbónica dos processos produtivos;
- Comprovação da viabilidade económica desde que se garanta o correto dimensionamento do mesmo e a adequada gestão de energia;

O **armazenamento térmico latente** é uma técnica de armazenamento a curto prazo que consiste em acumular energia térmica fazendo um certo material mudar de fase.
Os PCMs absorvem e libertam energia a uma temperatura constante, armazenando de 3 a 5 vezes mais calor por unidade de volume do que os materiais de armazenamento sensível.

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

**Integração de Energias Renováveis | Bioenergia**

Os processos industriais podem recorrer a combustíveis de base biológica para produção de 'bioenergia'. Exemplo disso são as **caldeiras a biomassa** para fornecimento de **calor a processos industriais**, que se aplicam fundamentalmente em indústrias que consomem gás propano GPL, gasóleo, fuel ou nafta. Em comparação com o gás propano GPL, a poupança económica é de 30%, sendo economicamente equivalente ao gás natural, e reduzindo a pegada de carbono e as emissões de CO2 em mais de 90%. Esta biomassa encontra-se muitas vezes associada à valorização energética de resíduos. Outro combustível muito promissor atualmente para a descarbonização da produção de calor em processos térmicos industriais é o hidrogénio 'verde', que pode dar resposta em muitos processos industriais nos quais a eletrificação não é possível, nomeadamente naqueles que requerem temperaturas muito elevadas (>400 ºC).

Os **processos Térmicos Industriais de Elevada Temperatura** (HT) têm um peso significativo no Consumo de Energia do Setor Industrial, e o seu calor é quase exclusivamente gerado a partir de combustíveis fósseis, de elevada densidade energética. Os únicos vetores energéticos/combustíveis de baixo carbono com potencial para substituição dos combustíveis fósseis são a biomassa, biometano / biogás e hidrogénio.

O **hidrogénio** tem potencial para substituir/complementar o **gás natural** como fonte de calor e energia na indústria, podendo utilizar uma mistura dos dois combustíveis misturando (***blending***).

Esta abordagem pode permitir que muitos processos industriais sejam capazes de aceitar volumes de H2 sem modificação (<5%), ou com a substituição de equipamentos mas sem necessidade de elevado grau de pureza do hidrogénio. Neste momento, está a ser feito muito trabalho de I&D para que as indústrias consumidoras de gás natural possam alimentar aos seus processos térmicos misturas de GN e H2 até 15 vol. % de H2 sem substituição de equipamentos (queimadores, fornos, caldeiras,…), apenas com adaptação dos mesmos. Também existe a possibilidade de utilizar H2 "Verde" conjugado com tecnologias de Captura de Carbono (CC). Apesar de soluções que requerem investimentos consideráveis, a sua viabilidade económica tenderá a aumentar. Prevê-se que as licenças de emissão cheguem aos 100 €/ton CO2 e que haja uma redução gradual das licenças CELE gratuitas até 2030 e pondera-se a adoção de medidas penalizadoras na utilização do gás natural.

| Ex. Consumo GN 4 500 kNm3/ano | |
|---|---|
| *Blending* de 10% | *Blending* de 20% |
| 3% de emissões de CO2 evitadas | 6,5% de emissões de CO2 evitadas |
| 11 640€ poupanças em licenças de emissão (de acordo com o custo atual – 39,62 €/ton CO2 | 25 221€ poupanças em licenças de emissão (de acordo com o custo atual – 39,62 € €/ton CO2 |
| 14 690€ poupanças em licenças de emissão (50€ €/ton CO2) | 31 828€ poupanças em licenças de emissão (50€ €/ton CO2) |

# 6.
# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
# CONCLUSÕES

Em termos tecnológicos, a indústria (e o **Setor da Fundição**) pode atingir as metas de descarbonização através das seis estratégias complementares:

**01.**Melhoria da **eficiência energética**, por implementação de melhores tecnologias disponíveis nos processos industriais (com enfoque nos processos térmicos) **reduzindo desperdícios de calor e reutilização fluxos de calor residual**;

**02.Substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis de baixo carbono** (promoção de utilização de gás natural nas indústrias onde permanece o consumo de fuelóleo, nafta ou outros combustíveis mais poluentes e que têm no gás natural uma alavanca de eficiência e descarbonização), por **biocombustíveis, eletricidade renovável e/ou por incorporação de gases renováveis como vetores energéticos**;

**03.Digitalização da indústria**, incluindo ferramentas novas de gestão dos consumos energéticos, promovendo a integração multi-vetor;

**04.**Alinhamento da indústria com os princípios da **Economia circular**;

**05.**Visão da indústria como um setor ativo no **sistema energético**.

**06.**Utilização de **tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS)**, quando a produção a montante ainda não é neutra em relação ao carbono.

Associação
Portuguesa de
Fundição

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 7.

# AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS E ROBÓTICA INDUSTRIAL

# 7.
# AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS E ROBÓTICA INDUSTRIAL
# ENQUADRAMENTO

Associação Portuguesa de Fundição

## CONCEITO DE AUTOMAÇÃO ROBÓTICA

A **automação industrial** é a utilização de sistemas de controlo, tais como computadores ou robôs e tecnologias da informação para lidar com diferentes processos e máquinas na indústria de forma a substituir a intervenção humana.

Existem vários tipos de máquinas de produção flexível utilizadas na indústria, nomeadamente:

**Controlador Lógico Programável** (PLC) - utilizado para armazenar instruções e implementar funções específicas (como sequenciamento, aritmética, temporização, lógica e contagem), utiliza memória interna programável, sendo aplicado habitualmente em "hardware" dedicado (configuração mecânica) (3500 milhões de unidades instaladas por ano).

**Controlador numérico computadorizado** (CNC) – programável, mas utilizado para *hardware* dedicado a uma tarefa específica (250 mil unidades instaladas por ano).

**Robótica** – programáveis mas difíceis de reprogramar, hardware flexível mas que está geralmente associado a acessórios específicos (ex. pinças, etc.) (330 mil unidades instaladas por ano).

Os robôs industriais são utilizados maioritariamente em funções de manuseamento, soldagem e na linha de montagem.

As aplicações da robótica industrial concentram-se, em larga medida, na indústria automóvel, e a China é o mercado onde são instalados anualmente mais robôs industriais. No entanto, a utilização de robôs em serviços tem crescido, nomeadamente nos robôs para logística, para ambientes públicos e nas aplicações para a Defesa. Entre 2012 e 2017, assistiu-se a um aumento de 18% no transporte por navio de robôs destinados a realizar operações de manuseamento para a fundição de metais, inclusive fundição injetada. Em Portugal, estes números são muito baixos ou nulos, com maior incidência em atividades como a moldagem de plástico e a soldadura por arco.

**Principais desafios enfrentados pela robótica:**

- **Hardware e software flexíveis** – o robô é flexível, os sistemas geralmente não, garras flexíveis, design inteligente das células de trabalho, mobilidade.
- **Deteção** – a flexibilidade do robô está altamente dependente de sensores. Visão 2D/3D, força, distância ainda são questões a desenvolver e afinar.
- **Programação offline** – robôs devem-se tornar mais como máquinas CNC.
- **Integração vertical e digital twin** – integração vertical de robôs, outras máquinas e sistemas IT de supervisão.
- **Colaboração humana** – robôs e aplicações colaborativas.

# 7.
# AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS E ROBÓTICA INDUSTRIAL
# ENQUADRAMENTO E APLICAÇÕES

Associação Portuguesa de Fundição

## ROBÔS COLABORATIVOS
**[segurança, normas e tipos de aplicações]**

Existem **questões de segurança** ainda por resolver associadas à robótica colaborativa que devem ser consideradas na análise custo-benefício da sua aplicação (norma EN ISO 12100 guia a avaliação de risco):

- *Risk vs Hazard*
  - *Hazard*: uma situação ou circunstância com o potencial para causar dano ou estragos.
  - Risk: a probabilidade combinada do evento mau ocorrer e o dano ou estrago máximo que é provável de ocorrer resultante do evento.
- Avaliação de Risco
  - Técnica para avaliar o risco de dano ou estrago que pode resultar de males identificados.
  - Technique for assessing the risk of harm or damage that could result from identified hazards
- Redução de Risco
  - O design geral e o processo de fabrico para asesgurarem que uma máquina será segura para utilizar.

**Aplicações**

Um robô colaborativo distingue-se de um robô convencional no sentido em que há presença humana na “fronteira” física do processo.

No âmbito da cláusula 5.10.4 da norma ISO 10218-1, um tipo de colaboração é a monitorização humana da velocidade e da separação do robô, como no exemplo de restabelecimento de partes de contentores por parte do robô. Neste caso, a velocidade é limitada a um valor Seguro e monitorizada, sendo a mitigação de risco feita programando a movimentação do robô apenas quando existe uma distância mínima de separação para o humano. Outro exemplo é o *Dual-Arm Concept Robot* da ABB, que é um robot colaborativo para a linha de montagem.

**Futuro**

- Há um grande potencial de crescimento para soluções automatizadas.
- A China lidera a instalação robótica na indústria, sendo que a reindustrialização do ocidente significa robotização.
- Os robôs colaborativos são bons para a imagem e para o marketing, mas o seu potencial e bons casos de uso ainda têm de ser explorados.
- Os robôs nos serviços serão adotados transversalmente, mas ainda é necessário encontrar bons casos de aplicação.
- Muito potencial de crescimento para a robótica de campo, que engloba muitas atividades desenvolvidas no exterior.

Associação
Portuguesa de
Fundição

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 8.

# RESUMO E CONCLUSÕES

# 8.
# RESUMO E CONCLUSÕES

Associação Portuguesa de Fundição

Os principais elementos das seis temáticas abordadas são resumidos em seguida, permitindo retirar uma série de conclusões sobre os ingredientes e ações necessários para a transformação 4.0 da indústria da fundição:

1. É fundamental desenvolver uma estratégia e plano de implementação detalhados para guiar a transformação digital de uma empresa. Isso implica começar por definir objetivos claros com métricas quantificadas, tendo em conta as caraterísticas internas da organização, os mercados onde se insere e as propostas de valor que esta leva a esses mercados. A empresa deve assegurar que tem uma pool de competências internas (pessoal qualificado) e posicionamento externo (parcerias com outras entidades) que assegurem um desenho e implementação adequadas da sua transformação digital. Deve estar clara a diferença (gap) entre o ponto atual e as metas que a organização quer atingir, o que apoiará à definição do roteiro de ações para a transformação digital. Na fase de execução, é importante manter a monitorização dos resultados e adaptações constantes para assegurar que os objetivos finais são atingidos.

2. O planeamento e escalonamento das operações, enquanto promotor da alocação ótima de recursos (ex. RH, equipamento), tendo em conta as restrições impostas pela organização, apresentam-se como um instrumento importante para otimizar o processo produtivo da empresa. O planeamento e escalonamento integrados, recorrendo a softwares especializados, podem levar a ganhos significativos na empresa (ex. redução do tempo dos ciclos produtivos, poupança na fatura energética).

3. Os digital twins recorrem a sistemas digitais para replicar a operação de um processo ou sistema físico na sua globalidade, assegurando a interface e sincronização em tempo real entre o sistema físico e o sistema digital. À semelhança dos motores de escalonamento, apresenta-se como uma ferramenta útil para fazer uma monitorização e análise detalhadas do processo produtivo, permitindo a identificação de potenciais problemas (ex. indicadores de desempenho de uma máquina) e soluções associadas (ex. períodos de manutenção que previnam avarias ou desempenho inferior da máquina).

# 8.
# RESUMO E CONCLUSÕES

Associação Portuguesa de Fundição

4. A qualidade 4.0 passa por adotar metodologias de monitorização da qualidade adaptadas às ferramentas que a indústria 4.0 dispõe (ex. sistemas de apoio à decisão, digital twins) de modo totalmente integrado com o sistema de produção e o ecossistema de informação em todo o ciclo de vida dos produtos. As aplicações apresentadas no manual elaboram bem a descrição do produto e do processo produtivo e como os Sistemas de Apoio à Decisão no Controlo da Qualidade, com capacidades Preditivas e Prescritivas (SADCoPQ), através de modelos de deteção e previsão, identificam problemas e soluções associadas (ex. afinações das máquinas, mudança de ferramentas, etc.).

5. A eficiência energética e a descarbonização do consumo são fundamentais para qualquer empresa da indústria da fundição. Para além de apresentar o panorama de políticas e de financiamento públicos da UE e a nível nacional, o manual elenca uma série de opções técnicas que levam a poupanças substanciais nos processos industriais (redução no consumo de combustível, poupanças económicas e redução de emissões de gases com efeito de estufa). São descritas soluções eficientes a nível energético e ambiental para equipamentos como fornos, cadinhos, recuperadores de calor, compressores, sistemas de armazenamento de energia e fontes de produção de energia renovável.

6. A automação e a robótica industrial passam pela utilização de uma série de aplicações tecnológicas para substituir e assistir a intervenção humana no processo de fabrico. Existe uma tendência crescente no uso de aplicações da robótica industrial, embora estas se concentram maioritariamente na indústria automóvel. A robótica industrial levanta desafios tecnológicos e de segurança na sua aplicação. No entanto, setores como o da fundição devem estar abertos a adotar soluções desta índole, devendo sempre precedê-las de uma análise que perspetive um impacto quantificável positivo.

Estes pontos servem para focar os utilizadores deste documento para as principais prioridades que a indústria da fundição deve ter em conta na sua transformação digital. pontos servem para focar os utilizadores deste documento para as principais prioridades que as indústrias devem ter em conta na sua transformação digital.

Associação
Portuguesa de
Fundição

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 9.

# BIBLIOGRAFIA

# 9. BIBLIOGRAFIA



[1] UOL EdTech, «Mundo BANI: o que esperar do novo conceito?», https://uoledtech.com.br/blog/mundo-bani-o-que-esperar-do-novo-conceito, 2021. .

[2] Y. Koren, The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. John Wiley & Sons, Inc., 2010.

[3] F. Melchert, R. Winter, e M. Klesse, «Aligning process automation and business intelligence to support corporate performance management», enth Am. Conf. Inf. Syst. (AMCIS 2004), n. August, pp. 4053–4063, 2004, [Em linha]. Disponível em: http://www.vigilwiki.com/Content/PDF_Documents/Performance_Management/Aligning_Process_Automation_and_Business_Intelligence.pdf.

[4] K. Werner, K. Matthias, T. Georg, H. Jan, e S. Wilfried, «Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification», IFAC-PapersOnLine, vol. 51, n. 11, pp. 1016–1022, 2018, [Em linha]. Disponível em: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405896318316021?token=8C1F02CF6622DC6F37E5826DD425FB42DFF6D444C2417323A116CD0FB5CD4AC21B669A67A295329865A51D3D1609773C.

[5] G. Shao, S. Jain, C. Laroque, L. H. Lee, P. Lendermann, e O. Rose, «Digital Twin for Smart Manufacturing: The Simulation Aspect», Proc. - Winter Simul. Conf., vol. 2019-Decem, pp. 2085–2098, 2019, doi: 10.1109/WSC40007.2019.9004659.

[6] sadcopq, «Projeto SADCoPQ – Sistema de Apoio à Decisão no Controlo Preditivo da Qualidade», 2022. https://sadcopq.com/.

[7] Solar Payback, «Solar Heat for Industry», 2017. [Em linha]. Disponível em: https://www.solar-payback.com/multimedia/?lang=pt-br.

[8] EIA, «International Energy Outlook 2018», 2018. [Em linha]. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/executive_summary.php#:~:text=EIA's International Energy Outlook 2018,China%2C India%2C and Africa.

Associação
Portuguesa de
Fundição

CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

# 10.

# ANEXOS

# 10. ANEXOS

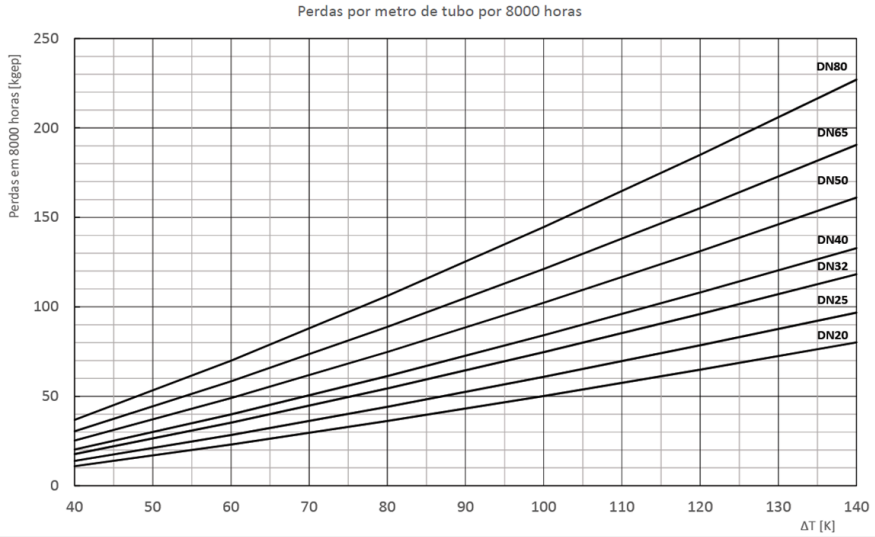



Gráfico 5 - Perdas por metro de tubo por 8000 metros (fonte)

Perdas de calor em $kg_{ep}$ para 8000 h de funcionamento em válvulas não isoladas.

| | 1/2 " | 1 " | 1 1/2 " | 2 " | 3 " | 4 " | 6 " | 8 " | 10 " | 12 " | 14 " | 16 " | 18 " | 20 " |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ΔT [ °C] | DN 15 | DN 25 | DN 32 | DN 50 | DN 80 | DN 100 | DN 150 | DN 200 | DN 250 | DN 300 | DN 350 | DN 400 | DN 450 | D 500 |
| 70 | 148 | 194 | 228 | 285 | 399 | 559 | 776 | 1084 | 1437 | 1825 | 2191 | 2590 | 2944 | 3423 |
| 80 | 173 | 226 | 266 | 332 | 465 | 652 | 904 | 1264 | 1677 | 2129 | 2555 | 3020 | 3433 | 3992 |
| 90 | 199 | 260 | 305 | 382 | 535 | 749 | 1039 | 1452 | 1926 | 2445 | 2934 | 3469 | 3943 | 4584 |
| 100 | 226 | 295 | 347 | 434 | 607 | 850 | 1180 | 1648 | 2185 | 2774 | 3329 | 3937 | 4474 | 5203 |
| 110 | 253 | 332 | 390 | 487 | 682 | 955 | 1325 | 1852 | 2456 | 3118 | 3742 | 4424 | 5028 | 5847 |
| 120 | 282 | 369 | 434 | 543 | 761 | 1065 | 1477 | 2064 | 2738 | 3477 | 4172 | 4932 | 5606 | 6519 |
| 130 | 313 | 409 | 482 | 602 | 843 | 1180 | 1637 | 2286 | 3032 | 3850 | 4621 | 5463 | 6209 | 7219 |
| 140 | 344 | 450 | 530 | 662 | 927 | 1299 | 1803 | 2518 | 3340 | 4241 | 5089 | 6017 | 6839 | 7952 |
| 150 | 377 | 494 | 581 | 726 | 1017 | 1424 | 1976 | 2760 | 3661 | 4648 | 5578 | 6595 | 7495 | 8716 |
| 160 | 412 | 539 | 634 | 792 | 1110 | 1554 | 2156 | 3012 | 3996 | 5073 | 6089 | 7199 | 8181 | 9514 |
| 170 | 448 | 587 | 68 | 863 | 1207 | 1691 | 2345 | 3276 | 4346 | 5518 | 6622 | 7829 | 8898 | 10346 |
| 180 | 486 | 636 | 748 | 935 | 1309 | 1832 | 2542 | 3552 | 4711 | 5983 | 7178 | 8487 | 9646 | 11216 |
| 190 | 526 | 687 | 808 | 1010 | 1415 | 1980 | 2748 | 3839 | 5093 | 6467 | 7761 | 9175 | 10428 | 12125 |
| 200 | 567 | 741 | 872 | 1089 | 1526 | 2135 | 2964 | 4140 | 5492 | 6973 | 8367 | 9893 | 11244 | 13074 |
| 210 | 609 | 797 | 938 | 1172 | 1641 | 2297 | 3188 | 4454 | 5907 | 7501 | 9002 | 10642 | 12096 | 14065 |
| 220 | 654 | 855 | 1007 | 1258 | 1762 | 2467 | 3423 | 4781 | 6341 | 8053 | 9663 | 11425 | 12985 | 15099 |

Tabela 3 - Perdas de calor em kg para 8000 h de funcionamento em válvulas não isoladas (fonte)

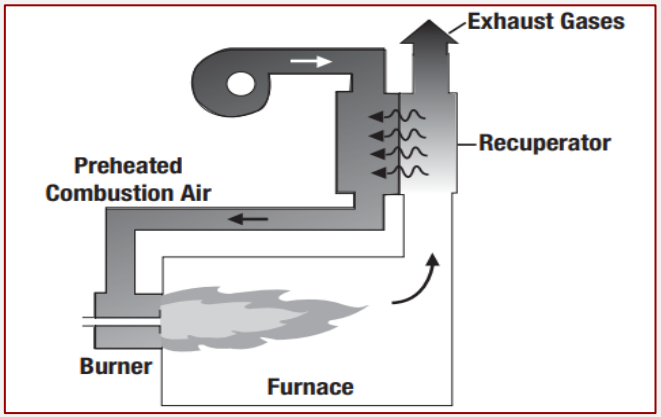
| DN | Temperatura máxima de operação [ºC] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 420 |
| 20 | 30 | 30 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 25 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 32 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 50 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 |
| 65 | 30 | 30 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 80 |
| 80 | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 80 |
| 100 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 |
| 150 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 80 | 100 |
| 200 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 80 | 100 |
| 250 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| 300 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| 350 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| 400 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| 450 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| 500 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| 600 | 50 | 50 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| > 600 | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 | 100 | 150 |
| Equipamentos | 50 | 50 | 80 | 80 | 100 | 100 | 100 | 150 |

Tabela 2 – Temperatura máxima de operação conforme o diâmetro nominal dos equipamentos (fonte)

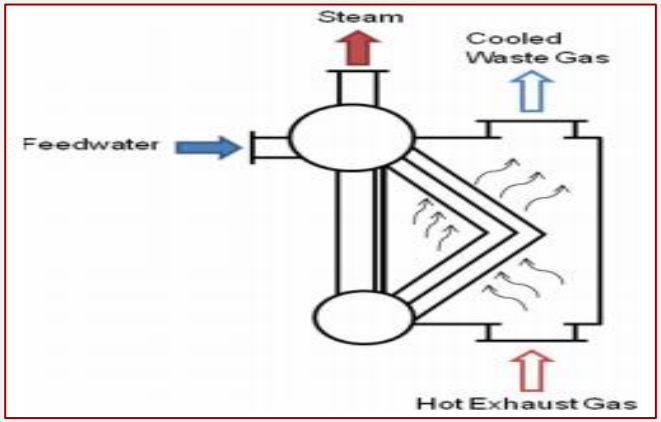
Associação Portuguesa de Fundição

## Recuperação e aproveitamento do calor residual

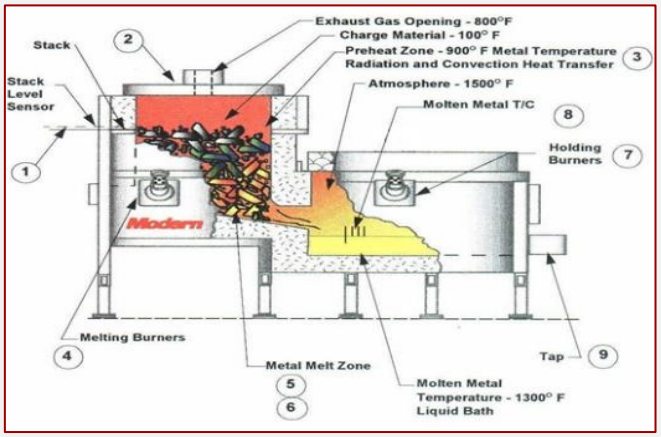
### Pré Aquecimento do ar de combustão




### Produção de água quente ou vapor




### Pré Aquecimento da matéria prima




### Produção de energia elétrica Ciclos Orgânicos de Rankine (CRO)

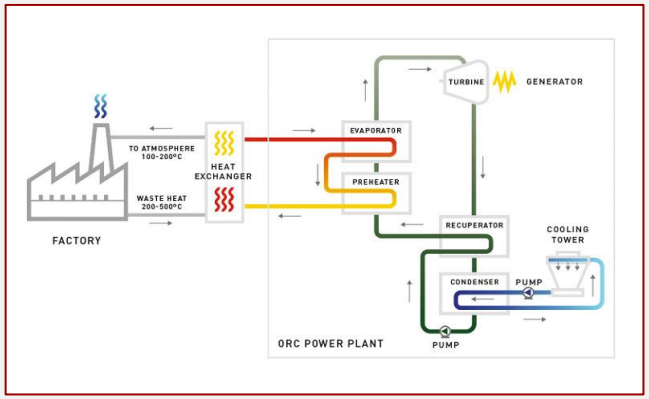



Figura 28 – Vertentes industriais nas quais pode ocorrer recuperação e aproveitamento do calor residual (fonte)

# CAPACITAÇÃO DO SETOR DA FUNDIÇÃO: A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E DIGITAL

Associação Portuguesa de Fundição


https://apf.com.pt/

info@apf.com.pt

Rua Eng. Ezequiel Campos, 525, 1º 4100-233 Porto

(+351) 226 090 675



NORTE2020
PROGRAMA OPERACIONAL REGIONAL DO NORTE

PORTUGAL 2020

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional