



ANDRÉ FILIPE
LOIÇÃO ROCHA

**ANÁLISE DA INSTALAÇÃO DE
UMA LINHA DE ABASTECIMENTO
DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS
DE RESÍDUOS NA FÁBRICA DA
SECIL**

Relatório de Dissertação/projeto/estágio/projeto
de investigação do Mestrado em Engenharia de
Produção

ORIENTADORES

Professora Doutora Margarida Mateus

Professor Doutor João Lourenço

Junho de 2023

Se o eu do passado e o eu do futuro conversassem, esperaria que o do futuro acreditasse que o do passado ainda tem tudo para aprender. Espero que o do passado considere o mesmo em relação ao do futuro. Que a vontade de lutar seja a mesma em ambos.

Agradecimentos

O primeiro agradecimento é sempre aos meus pais, irmãos, avós e restante família, pois a eles devo tudo o que sou e fazem parte de cada conquista ou derrota.

O segundo agradecimento é para a Secil, Companhia Geral de Cal e Cimento, uma casa que, para além de ter feito parte do meu crescimento, me deu a oportunidade de iniciar a minha carreira profissional num projeto de desenvolvimento tão importante e desafiante como o Projeto CCL – *Clean Cement Line*. O meu muito obrigado a toda a equipa, em especial ao Eng. Gonçalo Reis, pela oportunidade e por tudo o que me ensinou, à Doutora Margarida Mateus, pois o término desta etapa se deve, sobretudo, a ela, ao Dr. António Balastreiro, ao Duarte e ao Ricardo.

À Joana, pela força que me trouxe e que foi fundamental para me manter o rumo na reta final; a mais burguesinha. Aos meus amigos.

Ao Instituto Politécnico de Setúbal, pelo percurso académico que me proporcionou, principalmente ao coordenador do Mestrado em Engenharia de Produção, Professor Doutor Pedro Cunha, e ao meu orientador de Dissertação, Professor Doutor João Lourenço.

Uma última palavra para todos com que tive a oportunidade de me cruzar durante esta aventura que foi o Projeto CCL e com quem aprendi e cresci.

Ao olhar para mim durante esta curta caminhada, nada me dá mais alegria do que ver um rapaz a desfrutar de cada milímetro ao máximo. A todos, muito obrigado!

Resumo

O processo de produção de cimento gera, inevitavelmente, a emissão de dióxido de carbono. Além disso, a produção de clínquer requer fornecimento de calor, o que, historicamente, tem sido feito por meio de combustíveis fósseis. A política climática da União Europeia estabeleceu a obrigação de neutralidade de carbono para a indústria cimenteira até 2050. Com base nisso, a Cembureau apresentou um plano para substituir os combustíveis fósseis por alternativas. Em Portugal, a Secil desenvolveu o Projeto CCL - *Clean Cement Line*, com o objetivo de realizar o *revamping* de uma linha existente e a instalação de um calcinador com uma câmara de combustão para queima de combustíveis mais grosseiros em substituição aos fósseis. A linha agora opera com uma taxa de 85% de combustíveis alternativos (sendo 70% derivados de resíduos), um aumento de 30% em relação ao projeto anterior. Em função dessas mudanças, a estratégia e a logística de combustíveis na Secil foram repensadas. Identificou-se a necessidade de aumentar a capacidade de abastecimento do principal armazém da empresa para suprir o maior consumo decorrente do projeto. Assim, foi instalada e programada uma linha de abastecimento adicional, duplicando a capacidade existente. Com o aumento no consumo de Combustíveis Derivados de Resíduos, a garantia da qualidade desses materiais também se tornou mais importante. Nesse contexto, a tecnologia *Near-Infrared* foi identificada como uma opção promissora para medir o poder calorífico inferior desses combustíveis em tempo real.

Palavras-chave: *Cement Carbon Neutrality; Ladder Logics; Near-Infrared; Combustíveis Derivados de Resíduos; Poder Calorífico Inferior; Automação*

Abstract

Cement production process inevitably generates carbon dioxide emissions. Furthermore, clinker production requires a heat supply, which historically has been accomplished through the use of fossil fuels. The European Union's climate policy has established the obligation of carbon neutrality for the cement industry by 2050. Based on this, Cembureau has presented a plan to replace fossil fuels with alternatives. In Portugal, Secil has developed the CCL (Clean Cement Line) Project, aiming to revamp an existing line and install a calciner with a combustion chamber to burn coarser fuels as a substitute for fossil fuels. The line now operates with an 85% rate of alternative fuels (with 70% derived from waste), a 30% increase compared to the previous project. Due to these changes, Secil's strategy and logistics regarding fuel have been redone. The need to increase the supply capacity of the company's main warehouse to meet the higher consumption resulting from the project was identified. Therefore, an additional supply line was installed and programmed, effectively doubling the existing capacity. With the increased consumption of Waste-Derived Fuels, ensuring the quality of these materials has also become more important. In this context, Near-Infrared technology has been identified as a promising option for real-time measurement of the lower heating value of these fuels.

Keywords: *Cement Carbon Neutrality; Ladder Logics; Near-Infrared; Refuse Derived Fuel; Lower Heating Value; Automation*

Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Siglas e Acrónimos.....	xvii
Capítulo 1	20
1.1. Secil Empresa	20
1.2. Problemática do CO ₂ na indústria cimenteira	21
1.3. Projeto CCL – <i>Clean Cement Line</i>	22
1.3.1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e Automação.....	24
1.3.2. Zero Fossil Fuel – PPS1	24
1.4. Objetivo do trabalho	25
Capítulo 2	26
2.1. Introdução aos Combustíveis Derivados de Resíduos	26
2.1.1. Composição de CDR	27
2.1.2. Classificação de CDRs	28
2.1.3. Classificação de SRFs.....	28
2.2. Produção de Combustíveis através de Desperdícios Sólidos Urbanos	28
2.2.1. Combustível Derivado de Resíduos	29
2.2.2. Rendimento do Processo de Produção de CDRs	30
2.2.3. Produção de Solid Recovered Fuel	31
2.2.4. Rendimento do Processo de Produção de SRF	32
2.3. Tecnologias <i>Waste to Energy</i>	33
2.3.1. Inceneração e co-incineração.....	33
2.3.2. Gaseificação	34
2.3.3. Leito fluidizado	35
2.4. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	37

2.4.1. Europa	37
2.4.2. Ásia	39
2.4.3. Estados Unidos da América.....	40
2.4.4. América Latina	42
2.5. CRDs na Indústria do Cimento	43
2.6. Automação	44
2.6.1. Hierarquia dos Processos Automatizados	44
2.6.2. Automação na indústria do cimento	45
2.7. <i>Programmable Logic Controller (PLC)</i>	46
2.7.1. Sequential Function Charts (SFC).....	47
2.7.2. Function Blocks Diagram	50
2.7.3. Structured Text.....	51
2.7.4. Instruction List	51
2.8. <i>Relay Ladder Logics</i>	53
2.8.1. Relay Ladder Logics no Cimento	54
2.9. Monitorização do PCI – Estado da Arte	54
2.9.1. Indústria 4.0	55
2.9.2. Internet of Things.....	56
Capítulo 3	57
3.1. Produção de Clínquer	57
3.1.1. Preparação do cru	57
3.1.2. Calcinação	58
3.1.3. Clinquerização	58
3.2. Instalação Secil Outão	59
3.2.1. Linha IX Pré-Revamping	59
3.3. Instalação Secil Outão – <i>Revamping CCL</i>	60
3.3.1. Instalação do Calcinador	61
3.3.2. Instalação do Prepol	62
3.3.3. Instalação do Arrefecedor de Grelhas.....	63
3.3.4. Conduta do Ar Terciário	64
Capítulo 4	66
4.1. Combustíveis Usados na Secil.....	66
4.1.1. CDRs “Low Grade” e CDRs “High Grade”	67
4.1.2. Estratégia Armazenamento CDR	67

4.2. Armazenamento e Transporte de CDRs na Secil	67
4.2.1. Armazenamento de CDRs - Hangar O4.....	67
4.2.2. Transporte de CDRs ao Hangar O4	69
4.2.3. Entrega CDRs “Low Grade” ao Precalcinador.....	71
4.3. Análise Consumo Hangar O4	71
4.3.1. Simulação Consumo CDRs Prepol	71
4.4. Automação da Secil.....	74
4.4.1. Programação - Studio 5000, Rockwell Automation	74
4.4.2. Lógica da Programação	75
4.4.3. Sensorização.....	75
4.4.4. Sequência de Arranque.....	76
4.4.5. ECS Control Center	76
4.5. Programação Linha Abastecimento.....	77
4.5.1. Atribuição de Tags	77
4.5.2. Atribuição de I/Os	77
4.5.3. Atribuição de Exportação para Studio 5000.....	78
4.5.4. Rotinas dos motores do equipamento.....	79
4.6. Pontos de Seleção	80
4.6.1. Rotina do grupo	82
4.6.2. Rotina de simulação	83
4.7. ECS Control Center	83
4.7.1. Esquematização da linha	84
4.7.2. Identificação do Estado do equipamento	84
4.7.3. Simulação ECS Control Center	85
4.8. Metodologia e Resultados <i>Near Infrared</i>	86
4.9. Requisitos Técnicos de Monitorização de PCI – CDRs	86
4.10. Estado tecnológico da solução	87
4.10.1. STEINERT.....	89
4.10.2. LLA Instruments.....	89
4.10.3. EVK	90
4.11. Limitações NIR – Equipamentos Propostos.....	91
4.11.1. Contorno Limitações NIR – Equipamentos Propostos.....	91
4.11.2. Complementos Sensorização NIR.....	91
4.12. Otimização Sensorização NIR – Sistema de <i>Bypass</i>	92

4.13. Desenvolvimento de conceito NIR	92
4.14. Levantamento de pontos de leitura – DA 7250	93
4.14.1. Estação Descarga CDRs.....	94
4.14.2. Correia transportadora da estação de descarga.....	95
4.14.3. Correia Transportadora Tubular	95
4.14.4. Tela transportadora de entrega ao Prepol	96
Capítulo 5 – Conclusão	98
5.1.1. Utilização de Combustíveis na Secil.....	98
5.1.2. Upgrade linha de abastecimento do Hangar O4.....	98
5.1.3. Método de Programação.....	99
5.1.4. Programação Ladder Logics	99
5.1.5. Desenvolvimento Conceito NIR	100
5.1.6. Pontos de Leitura.....	100
Bibliografia.....	101
Anexo I.....	A.1

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Produção mundial de cimento em bilhões de toneladas.....	21
Figura 1.2 – Poster do Projeto CCL – <i>Clean Cement Line</i> com os objetivos a que estes se propõem.....	23
Figura 2.1 - Produção de RSUs em Megatoneladas/ano em vários países do mundo. Créditos da imagem atribuídos a [10].....	27
Figura 2.2 - Composição do RSU em várias regiões do mundo. Créditos da imagem atribuídos a [10].....	28
Figura 2.3 - Formas de produção de CDRs. Pode ver-se em <i>fluffs</i> (esquerda), <i>pellets</i> (centro) e <i>bricks</i> (direita).....	29
Figura 2.4 - Esquema da linha de produção de CDRs projetada e analisada em [19].....	30
Figura 2.5 - Gráfico com relação entre taxa de recuperação e poder calorífico obtido em [17].....	31
Figura 2.6 - Esquematização do processo de produção de <i>Solid Recovered Fuels</i> e suas classificações por granulometria [12].....	32
Figura 2.7 - Esquematização dos processos mecânicos usados na produção de SRFs [17].....	32
Figura 2.8 - Sistema de combustão de CDRs para produção de energia elétrica. Elaborado por [28].....	34
Figura 2.9 - Esquematização de reator para prática de gaseificação de CDRs. Esquematizado por [31].....	35
Figura 2.10 – Esquema de estação de combustão por leito fluidizado do tipo CFB. Adaptado de [33].....	36
Figura 2.11 - Gráfico com demonstração da gestão dos RSU, em Portugal, entre 2010 e 2020. Retirado de [38].....	37
Figura 2.12 - Representação da evolução da geração de desperdícios na Grécia entre 1996 e 2012, em Kg/ <i>Capita</i> [42].....	39
Figura 2.13 - Gráfico com o potencial de utilização de RSU para a produção de energia entre o ano de 2010 e 2034 na Arábia Saudita [44].....	40
Figura 2.14 - Esquematização da preferência dada ao tratamento de RSU	

nos Estados Unidos da América [52].....	41
Figura 2.15 - Gráfico com evolução do destino dos RSU nos estados Unidos da América entre 1960 e 2018, em toneladas [53].....	42
Figura 2.16 – Estrutura hierárquica das áreas constituintes dos processos automatizados [63].....	45
Figura 2.17 – Esquematisação do funcionamento de um PLC com relação das várias áreas que o constituem. Adaptado de [69].....	47
Figura 2.18 – Construção de um código em <i>Sequential Function Chart</i> com representação dos vários passos e das variáveis.....	48
Figura 2.19 – Transições da linguagem de programação SFC. Está representado uma transição simples (1), alternativa (2), divergente (3), convergente (4) e divergir e convergir em simultâneo (5).....	48
Figura 2.20 – Lógica construída em SFC com a descrição dos <i>inputs</i> e dos <i>outputs</i> gerados.....	49
Figura 2.21 – SFC construído com várias transições demonstradas.....	50
Figure 2.22 – Blocos de transição de FBD com diferentes funções assinaladas [74].....	50
Figura 2.23 – Código de programação desenvolvido em <i>Structured Text</i> para o controlo de equipamentos através de PLCs [77].....	51
Figura 2.24 - Definição de variáveis em <i>Instruction List</i>	52
Figura 2.25 - Label construída em <i>Instruction List</i> . A primeira coluna corresponde à <i>Label</i> , a Segunda ao <i>Operator</i> e a Terceira ao <i>Operand</i> de cada <i>Operator</i>	52
Figura 2.26 - Lista com <i>operators</i> usados em <i>Instruction List</i> para diferentes funções.....	52
Figura 2.27 - Comandos Contacto Normalmente Aberto e Contacto Normalmente Fechado usados em <i>Ladder Logic</i>	53
Figura 2.28 – <i>Rung</i> com representação da equação $a.b^{-}=c$ em <i>Ladder</i>	53
Figura 2.29 – <i>Rung</i> com a representação da equação $(a+b+c^{-}).d=e$ em	

<i>Ladder</i>	54
Figura 3.1 - Estrutura de um forno de produção de clínquer com a identificação das zonas de transformação da matéria.....	58
Figura 3.2 - Esquematização de uma linha de cimento constituída por ciclones e forno com satélites para arrefecimento do clínquer. Semelhante à Linha IX da Secil posteriormente ao Projeto CCL – <i>Clean Cement Line</i>	60
Figura 3.3 - Linha de produção de cimento esquematizada pela <i>Thyssenkrupp</i> com a inclusão do calcinador e do arrefecedor de grelhas no processo de produção de clínquer no processo [81].....	61
Figura 3.4 - Calcinador instalado na Secil no âmbito do Projeto CCL - <i>Clean Cement Line</i>	62
Figura 3.5 - Transportadores de alimentação de CDRs ao Prepol (a) e câmara de combustão do Prepol (b).....	63
Figura 3.6 - Instalação do arrefecedor de grelhas na parte final do forno rotativo. Este arrefecedor foi instalado no âmbito do Projeto CCL – <i>Clean Cement Line</i> e suporta a conduta do ar terciário.....	64
Figura 3.7 - Parâmetros de processo para uma linha com calcinador e arrefecedor de grelhas. É representada a temperatura do material, dos gases e a concentração de oxigénio para os vários pontos do processo.....	65
Figura 3.8 - Conduta de ar terciário instalada na Secil no âmbito do Projeto CCL - <i>Clean Cement Line</i>	65
Figura 4.1 - Esquema das boxes do Hangar O4 com esquematização da pilha de CDRs e posição dos transportadores de extração, abastecimento e grade.....	68
Figura 4.2 - Pilha de CDRs no interior de uma boxe do Hangar O4, na Secil.....	69
Figura 4.3 - Esquema da linha de abastecimento das boxes do hangar O4 da Secil, com identificação dos tipos de transportadores usados e fluxo do combustível.....	71
Figura 4.4 - Simulação do <i>stock</i> de CDRs para o período de uma semana	

de abastecimento com instalação original de abastecimento do hangar.....	72
Figura 4.5 - Simulação do <i>stock</i> de CDRs para o período de uma semana após a instalação da nova de abastecimento no âmbito do Projeto CCL – <i>Clean Cement Line</i>	73
Figura 4.6 – Esquema da linha de abastecimento às boxes do Hangar O4 da Secil. Pode ver-se que foi feita a instalação de uma linha gémea da existente.....	74
Figura 4.7 - Sala de comando centralizado da Secil.....	76
Figura 4.8 – Rotinas geradas no <i>Studio</i> 5000 para a nova instalação de abastecimento de CDRs às boxes do Hangar O4. Estas rotinas estão contidas no Grupo 22, PLC O2-O4.....	79
Figura 4.9 - Lógica construída em <i>Ladder</i> para o acionamento da correia transportadora O4J21. É possível ver as condições necessárias para iniciar a marcha e as condições de paragem do equipamento.....	80
Figura 4.10 - Rotina do alarme com designação O4J22M1T41, correspondente a um termístor.....	80
Figura 4.11 - Rotina com a lógica para seleção de armazenamento à boxe D do Hangar O4.....	81
Figura 4.12 - Rotina criada para o posicionamento da válvula de desvio com as respetivas condições para a mudança de posição.....	82
Figura 4.13 - Rotina do grupo O4G22 com as condições dos <i>interlocks</i>	82
Figura 4.14 - Rotina de simulação dos sinais do grupo O4G22. Usada para similar o envio dos sinais de campo ao PLC de forma a testar a lógica de automação.....	83
Figura 4.15 - Interface do software <i>ECS Control Center</i> com esquematização das linhas de abastecimento de CDRs ao hangar O4 da Secil.....	84
Figura 4.16 - Painel de simulação de sinais do <i>ECS Control Center</i>	85
Figura 4.17 - Página criada <i>ECS Control Center</i> de gestão de equipamentos responsáveis pelo transporte de combustíveis alternativos para a Linha VIII e Linha IX da Secil.....	86

Figura 4.18 - Sensor <i>Steinert</i> para medição da qualidade de CDRs (a) e interface de controlo dos parâmetros (b).....	89
Figura 4.19 - Análise de amostra de CDRs com o sensor da LLA <i>Instruments</i> (a) e interface com os parâmetros de controlo em tempo real (b).....	90
Figura 4.20 - Correlação entre os valores previstos pela leitura NIR e valores obtidos pelo Laboratório de Qualidade do Outão.....	93
Figura 4.21 - Unidade de descarga de CDRs da Secil Outão.....	94
Figura 4.22 - Transportador de tela que recebe os CDRs da unidade de descarga. Constitui um ponto de leitura eficaz devido a ser aberto.....	95
Figura 4.23 – Troço de transferência de material de CDRs à zona de secagem. Ponto de leitura válido devido à facilidade de instalação do sensor na estrutura.....	96
Figura 4.24 - Tela transportadora de alimentação do Prepol.....	97
Figura A.1 - Hangar O4 utilizado para armazenar CDRs na Secil e transportador de lâminas de transporte de CDRs ao topo do hangar.....	A.1
Figura A.2 - Boxes de Armazenamento de CDRs no interior do Hangar O4.....	A.1
Figura A.3 - Grade no interior da boxe de armazenamento de CDRs do Hangar O4.....	A.2
Figura A.4 - Transportador de arrasto de abastecimento das boxes pelo topo, e guilhotinas pneumáticas de seleção de boxe a abastecer.....	A.2
Figura A.5 - Traseira das unidades de descarga de CDRs e transportador de tela de receção.....	A.3

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Parâmetros comparativos entre os tipos BFB e CFB [29]....	36
Tabela 2.2 - Destino atribuído aos RSU em vários países da Europa [41]..	38
Tabela 2.3 - Composição dos RSU em várias regiões da China [43].....	39
Tabela 2.4 - Número de estações de WtE em vários estados dos Estados Unidos da América, e capacidade dos mesmos [50].....	41
Tabela 2.5 - Geração de RSU em vários países da América Latina, em Kg/Habitante/Dia. Retirado de [54].....	43
Tabela 2.6 - Simulação de modelos económicos de utilização de CDRs e efeitos numa indústria de cimento [56].....	44
Tabela 3.1 – Constituintes do clínquer e proporção.....	59
Tabela 4.1 - Poder Calorífico Inferior dos Combustíveis Usados na Secil Outão.....	66
Tabela 4.2 - Tabela usada para atribuir <i>tag</i> e I/Os aos equipamentos instalados no âmbito do Projeto CCL - <i>Clean Cement Line</i> , e respetivos sinais.....	78
Tabela 4.3 – Cores dos esquemas dos equipamentos no <i>software ECS Control Center</i> e o seu significado.....	85
Tabela 4.4 – Comparação entre sensores propostos por <i>Steinert</i> , LLA e EVK.....	88

Lista de Siglas e Acrónimos

BFB	<i>Bubbling Fluidized Bed</i>
CCL	<i>Clean Cement Line</i>
CDR	Combustíveis Derivados de Resíduos
CEMBUREAU	<i>European Cement Association</i>
CFB	<i>Circulating Fluidised Bed</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSR	Combustíveis Sólidos Recuperados
DCI	Desperdício Comercial e Industrial
DCS	Distributed Control System
DI	<i>Digital Input</i>
ERP	Enterprise Resource Planning
FBD	<i>Function Blocks Diagram</i>
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
I/O	<i>Input/Output</i>
IL	<i>Instruction List</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LQLO	Laboratório de Qualidade do Outão
NC	<i>Normaly Closed</i>
NIR	Near-Infrared
NO	<i>Normaly Opened</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PET	Polietileno Tereftalato
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PLS	Mínimos Quadrados Parciais
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

S	Enxofre
SFC	<i>Sequential Function Chart</i>
SRF	<i>Solid Recovered Fuel</i>
ST	<i>Structured Text</i>
UE	União Europeia
WtE	<i>Waste to Energy</i>

Lista de Símbolos

A_c	Área da célula
B_c	Banda de Coerência
h	Hora
$Kcal$	Kilocaloria
Kg	Kilograma
$kTon$	Kilotonelada
m^3	Metro cúbico
MJ	Megajoule
mm	Milímetro
min	Minuto
$MTon$	Megatonelada
MW	Megawatt
s	Segundo
ton	Tonelada
$^{\circ}C$	Graus Celsius

Capítulo 1

1.1. Secil Empresa

A história da Secil inicia-se em 1904 com a instalação da fábrica do Outão. Tinha sido fundada a Companhia de Cimentos de Portugal, com o nome “Compagnie des Ciments du Portugal”. Atualmente, a Secil é um grupo empresarial focado na produção e comercialização de cimento, argamassas, betão pronto, caule hidráulica e pré-fabricados de betão. Integra também várias empresas de desenvolvimento de soluções na área da preservação do ambiente e na valorização energética de resíduos.

A marca Secil foi criada em 1925. Em 1930, deu-se a fusão da Secil com a Companhia Geral de Cal e Cimento, tendo a participação das firmas dinamarquesas *F.L Smidth & Co.* e *Hödjgaard & Schultz A/S*. Nascia, assim, a empresa que se designaria “SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimentos, S.A”. Em 1994, a Secil passou a ser uma empresa de capital inteiramente privado e a Semapa adquiriu 51% da Secil e a totalidade da empresa CMP, passando a ser detentora das fábricas de cimento Maceira-Liz e Cibra-Pataias. A Secil teve 49% do seu capital adquirido à Semapa por parte da irlandesa CRH Plc; esta aquisição durou até 2011, tendo a Semapa voltado a adquirir o capital e a ser acionista único [1].

A nível internacional, a Secil apresenta atividade em Angola, Brasil, Cabo Verde, Espanha, Holanda, Líbano e Tunísia. Tem oito fábricas de cimento, o que se traduz numa capacidade de produção anual de 9,75 milhões de toneladas. Em Portugal, assegura mais de 35% das necessidades de cimento através da fábrica do Outão, Maceira-Liz e Cibra-Pataias tendo capacidade de produção de 4 milhões de toneladas de cimento por ano [1].

A Secil-Outão tem capacidade de produção de 2 milhões de toneladas de cimento, por ano, sendo um dos maiores complexos fabris do ramo a operar em território nacional. Contribuem para o seu êxito fatores como a excelente localização, o fácil acesso por via rodoviária, ferroviária e marítima e a abundância de matéria-prima nas pedreiras do vale onde se encontra. Já a Maceira-Liz foi pioneira na produção de cimento do tipo Portland, tendo atualmente uma produção aproximada de 1,5 milhões de toneladas de cimento e produzindo também sacos de papel em paralelo nas suas instalações. A localização da Cibra-Pataias permite que esta beneficie das vantagens naturais da região; a pedra e

areias apresentam a composição e a qualidade necessárias para tornar esta fábrica na única a produzir cimento branco em Portugal [2].

Virada para o futuro e procurando modernização, a Secil tem investido significativamente em alternativas mais sustentáveis para reduzir as suas emissões de CO₂, nomeadamente através do aumento das suas eficiências térmica e elétrica, apostando no coprocessamento de combustíveis alternativos, utilizando matérias-primas secundárias e ensaiando tecnologias inovadoras de captação de carbono (microalgas) e de produção de cimento e clínquer de baixa intensidade carbónica [1].

1.2. Problemática do CO₂ na indústria cimenteira

O betão é o material de construção mais utilizado mundialmente, tendo, por esta razão, um enorme impacto no meio ambiente e num desenvolvimento sustentável. Este material é produzido com matérias-primas acessíveis, é de fácil utilização e possui uma boa resistência e durabilidade. Estas qualidades tornam-no indispensável para satisfazer as necessidades da sociedade moderna, nomeadamente na construção de infraestruturas, indústrias e habitações. Na figura 1.1, é visível que, ao longo das últimas décadas, houve crescimento na produção de cimento. Verifica-se que este crescimento cessou em 2013 e estagnou a partir de 2018, com uma produção mundial anual de 4,1 bilhões de toneladas [3].

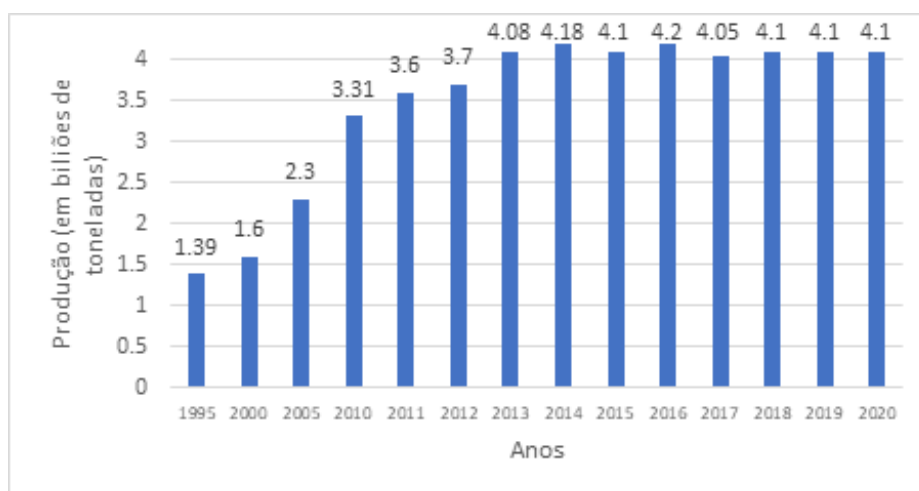


Figura 1.1 - Produção mundial de cimento em bilhões de toneladas.

Um dos problemas associados a esta indústria está relacionado com a emissão de grandes quantidades de CO₂. Como é sabido, o CO₂ é um gás de efeito de estufa, contribuindo para o indesejado aquecimento global. Estima-se que a indústria cimenteira seja responsável pela produção de, aproximadamente, 5% das emissões antropogénicas globais de CO₂. Assim, torna-se essencial adotar alternativas sustentáveis para a redução da emissão deste gás nesta indústria [3]. O processo de produção de cimento engloba quatro fases principais: extração e preparação de matérias-primas; cozedura nos ciclones e forno rotativo; moagem; comercialização.

Estas emissões de CO₂ provêm, essencialmente (50-60%) da libertação natural que ocorre no processo de descarbonatação do calcário para, tal como descrito abaixo, obtenção de silicatos e aluminatos de cálcio necessários para a produção do clínquer. Por outro lado, aproximadamente, 40% das emissões de CO₂ provêm da combustão de combustíveis fósseis no forno rotativo e os restantes 10% resultam de emissões indiretas devido ao consumo de energia elétrica, principalmente durante a moagem das matérias-primas e do cimento. De acordo com os dados da produção anual de clínquer e cimento, no período entre 2016 e 2020, estima-se que foram emitidos cerca de 700-800 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido e cerca de 500-700 kg de CO₂ foram libertados por tonelada de cimento produzido [4].

De acordo com a política climática da União Europeia, UE, a indústria cimenteira é obrigada a reduzir as emissões de CO₂ em cerca de 30%, até 2030, com o objetivo de atingir zero emissões até 2050. Face ao exposto, a melhoria da eficiência energética e a busca por novos tipos de cimentos que possam substituir, parcialmente, o clínquer, através da aplicação de subprodutos industriais, constituem os objetivos prioritários dos produtores de cimento. Existe interesse na substituição dos combustíveis fósseis por Alternativos [5]. De forma a apoiar a imposição da UE, a CEMBUREAU, Associação Europeia de Cimento, apresentou um plano para definir as metas a alcançar para a utilização de Combustíveis alternativos numa proporção de 60% até 2030 e 90% até 2050 [6].

1.3. Projeto CCL – *Clean Cement Line*

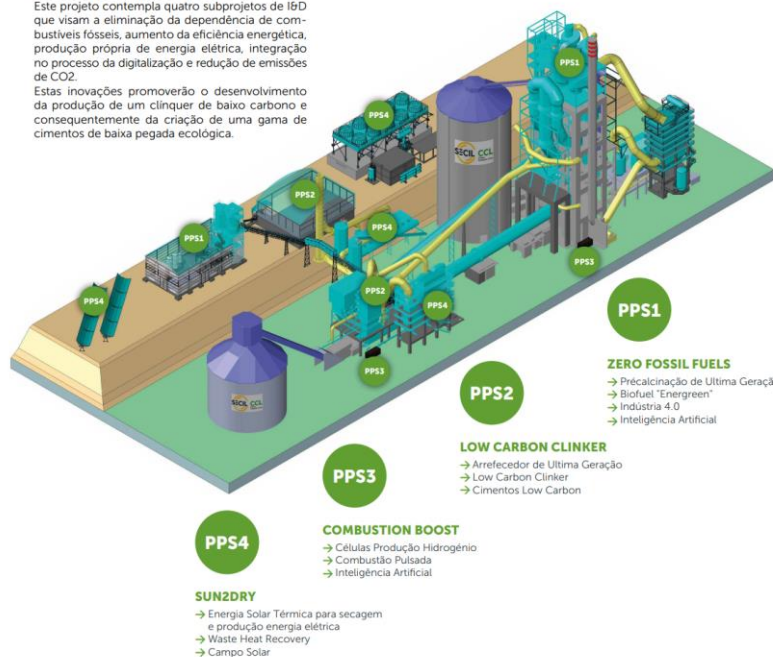
A Secil, como grupo, é uma empresa virada para o futuro e o desenvolvimento sustentável está em linha com as suas ideias. O projeto CCL – *Clean Cement Line* foi apresentado pela Secil e é classificado como Projeto de Interesse Nacional com financiamento do P2020 [7]. Tem como principal objetivo a implementação de novas tecnologias de produção de cimento à existente Linha IX da Fábrica do Outão. Engloba quatro subprojetos de Investigação e Desenvolvimento com o objetivo de reduzir a emissão de dióxido de carbono, aprimorar a eficiência energética, produzir energia elétrica e promover a digitalização, sensorização, controlo e tecnologias de informação, apoiando-se nos conceitos de sistemas *cyber-físicos*, *Internet of Things* (IoT) e computação em *cloud* com aplicação aos processos [8]. O projeto CCL é constituído por quatro subprojetos [9]. Na figura 1.2, é possível ver o cartaz do Projeto CCL – *Clean Cement Line*, com a indicação dos quatro subprojetos a que este se compromete desenvolver e os benefícios globais esperados.

PROJETO CLEAN CEMENT LINE

O Projeto **Clean Cement Line** tem por objetivo o desenvolvimento e demonstração de uma nova tecnologia de produção de cimento.

Este projeto contempla quatro subprojetos de I&D que visam a eliminação da dependência de combustíveis fósseis, aumento da eficiência energética, produção própria de energia elétrica, integração no processo da digitalização e redução de emissões de CO₂.

Estas inovações promoverão o desenvolvimento da produção de um clínquer de baixo carbono e consequentemente da criação de uma gama de cimentos de baixa pegada ecológica.



DESIGNAÇÃO DO PROJETO:

CCL – Clean Cement Line

CÓDIGO DO PROJETO:

LISBOA-01-0247-FEDER-027500

PROGRAMA FINANCIADOR:

Programa Operacional Regional de Lisboa

TIPOLOGIA DA OPERAÇÃO:

SI I&DT Empresarial - Regime Contratual

ORGANISMO:

Agência para o Investimento e Comércio Externo de Portugal, E.P.E.

OBJETIVO PRINCIPAL:

Desenvolvimento e Demonstração de uma linha de produção de cimento limpa.

REGIÃO DE INTERVENÇÃO:

Lisboa

ENTIDADE BENEFICIÁRIA:

SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, SA.

DATA DE APROVAÇÃO:

03-02-2020

DATA DE INÍCIO:

01-01-2019

DATA DE CONCLUSÃO:

31-08-2023

INVESTIMENTO TOTAL:

86.339.791,77

CUSTO TOTAL ELEGÍVEL:

37.311.932,22

APOIO FINANCEIRO DA UNIÃO EUROPEIA

ATRAVÉS DO FEDER:

14.924.772,89

BENEFÍCIOS GLOBAIS ZEROFÓSSEIS

20%
DE REDUÇÃO DE
EMISSIONES DE CO₂

20%
DE REDUÇÃO DE ENERGIA
CONSUMOS ENERGIA
TÉRMICA

30%
DE PRODUÇÃO PRÓPRIA
DE ENERGIA ELÉCTRICA



Figura 1.2 - Poster do Projeto CCL – *Clean Cement Line* com os objetivos a que estes se propõem.

Os quatro subprojetos de desenvolvimento que constituem o Projeto CCL são designados por *Zero Fossil Fuel*, *Low Carbon Clinker*, *Combustion Boost* e *Sun2Dry*.

O projeto *Zero Fossil Fuel*, PPS1, foca-se na instalação de tecnologias inovadoras na produção de cimento, na instalação de tecnologias de última geração, no que toca à realização do processo de calcinação, e possibilitará a otimização da eficiência energética, de produção, e a implementação de projetos relativos à indústria 4.0.

O projeto *Low Carbon Clinker*, PPS2, foca-se na instalação de um arrefecedor de clínquer de última geração, algo inovador na fábrica do Outão. Esta instalação irá ainda apoiar a produção de clínquer *Low Carbon*.

O projeto *Combustion Boost*, PPS3, pretende a instalação de uma célula de produção de hidrogénio de forma a potenciar a combustão do queimador principal do forno.

O projeto *Sun2Dry*, PPS4, pretende realizar o aproveitamento do calor dos gases do forno para produção de energia elétrica e secagem de combustível.

1.3.1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e Automação

As palavras “competitividade”, “qualidade” e “custo” têm alta importância para as empresas, no mundo moderno, em qualquer área de negócio, e o Projeto CCL é a resposta da Secil para não ficar atrás. A Organização das Nações Unidas definiu 17 objetivos de desenvolvimento sustentável e podem ser abordados pelas empresas como guia de aprendizagem. O consumo de energia, a poluição do meio ambiente e a utilização de recursos são pontos de uma elevada complexidade numa empresa e com vários fatores que contribuem para estes e em que cada detalhe pode ser estudado com o objetivo de se obter uma melhoria e conseguir grandes benefícios.

O crescimento da relevância dos temas abordados anteriormente faz com que cada organização crie mecanismos que lhe permitam adaptar-se fácil e rapidamente aos desafios. O crescimento do digital vem trazer a possibilidade da implementação de processos automatizados. Facilitou-se a recolha, análise e armazenamento de dados e permitiu otimizar recursos, aperfeiçoar a qualidade do produto, reduzir impactes ambientais e investir na qualidade de trabalho dos colaboradores.

As cimenteiras são fábricas ricas em aspetos por explorar e melhorar. O consumo de energia e combustíveis e emissões inerentes ao processo produtivo são algumas dessas áreas. Os processos automatizados são abundantes, quase não existindo presença de pessoas no processo a não ser para comando. A digitalização tem vindo a crescer e persegue objetivos, tais como o de garantir a qualidade do produto, medir e controlar emissões, ler e otimizar o processo e garantir a integridade deste. Assim sendo, o estudo e implementação da automação e digitalização nesta indústria é fundamental.

1.3.2. Zero Fossil Fuel – PPS1

O PPS1 do Projeto CCL apresenta uma grande mudança na Secil e na forma como a fábrica opera e produz cimento. Destaca-se a instalação do processo de calcinação de última geração com o objetivo claro de aprimorar o processo de calcinação indispensável e incontornável à produção de cimento,

tendo como objetivo reduzir emissões de dióxido de carbono. Esta instalação engloba um conjunto de novos equipamentos, incluindo uma câmara de combustão que servirá como um novo ponto de calor no processo. Projetos como este criam a necessidade de se avaliar a forma como se faz a atual gestão de recursos em cimenteiras como a Secil. Uma variável de interesse é a gestão dos combustíveis; a câmara de combustão tem características que irão permitir a utilização de combustível mais grosseiro e de pior qualidade, como é o caso dos Combustíveis Derivados de Resíduos (CDRs). A opção por estes irá reduzir o consumo de combustíveis de origem fóssil. Este equipamento irá ser mostrado adiante.

Com este projeto, pretende-se também fazer o desenvolvimento e instalação de ferramentas digitais que permitam apoiar a condução do processo ou a tomada de decisões por parte de intervenientes humanos na gestão e/ou manutenção da fábrica.

1.4. Objetivo do trabalho

Com este trabalho, pretende-se fazer a análise da nova instalação responsável pelo estágio de calcinação da matéria-prima e das alterações a que está conduzirá na otimização da utilização de combustíveis na Secil. O novo ponto de calor introduzido no processo de calcinação irá fazer com que seja necessária a entrega de combustível à torre de calcinação; anteriormente todo o combustível era entregue ao queimador do forno. Assim, numa primeira fase, pretende-se apresentar a logística de consumo de combustível da Secil posteriormente à implementação do Projeto CCL. De seguida, será mostrada a análise do novo consumo de combustíveis para a Linha IX.

Na segunda fase, irá mostrar-se como é construída a lógica de programação dos equipamentos em operação na Secil e comparar esse modo de atuar com o que se tem vindo a realizar ao longo dos tempos na indústria do cimento, incluindo a fábrica do Outão, tendo como base a literatura. A automação na indústria do cimento não é inovadora; processos automatizados controlados por PLC e sistemas SCADA foram instalados nas duas últimas décadas do século XX. As linhas de produção de cimento continuam a operar sem a necessidade da intervenção de mão de obra humana, com exceção de atividades de suporte como manutenção e limpeza. Como se verá adiante, a literatura existente na automação, incluindo a área da indústria cimenteira, não é recente; pretende-se observar o desenvolvimento na lógica por trás da programação de PLCs.

Numa terceira fase, irá fazer-se a análise de soluções digitais para a recolha do Poder Calorífico Inferior (PCI) de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDRs). Estes eram utilizados na Secil anteriormente ao início do Projeto CCL – *Clean Cement Line*. Com a introdução de um ponto de calor na torre, estes continuarão a ser utilizados e é esperado que o seu consumo aumente, sendo bastante útil a possibilidade de recolha da sua qualidade.

Capítulo 2

2.1. Introdução aos Combustíveis Derivados de Resíduos

Definem-se como combustíveis derivados de resíduos os combustíveis fabricados à base de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) através de tratamento mecânico ou biomecânico e com a finalidade de serem incinerados como combustível, dando um último aproveitamento ao resíduo em alternativa à sua deposição em aterro. Para além de apoiar a economia circular, o uso de CDRs apoia o decréscimo das emissões de metano, formado a partir da decomposição dos resíduos em aterro, e substitui os combustíveis fósseis. Esta necessidade surge também do aumento exponencial da população mundial e consequente aumento da produção de RSU. O maior consumidor deste combustível é a indústria do cimento [10]. Estes são fabricados a partir da parte com alto poder calorífico dos RSU [11]. Na figura 2.1, pode ver-se a produção de RSU, em Megatoneladas/ano, em vários países do mundo.

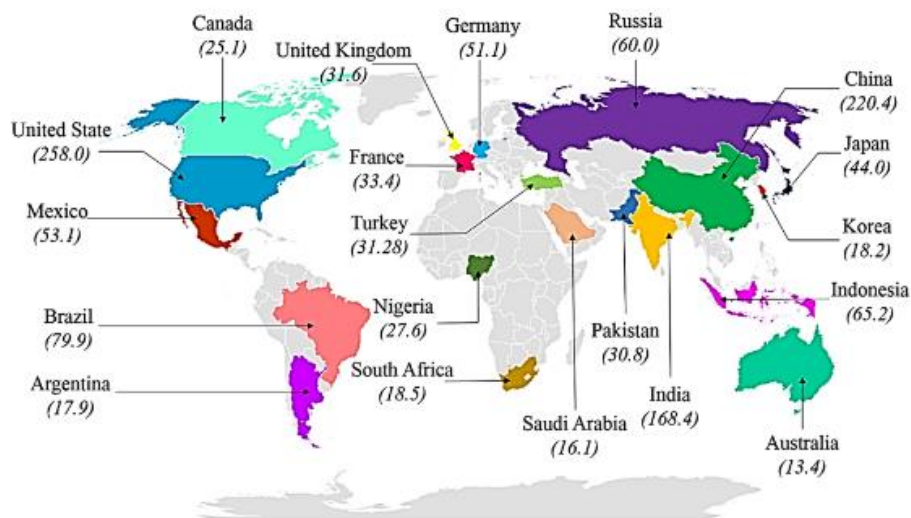


Figura 2.1 - Produção de RSUs em Megatoneladas/ano em vários países do mundo. Créditos da imagem atribuídos a [10].

2.1.1. Composição de CDR

Os CDRs são constituídos por desperdícios alimentares, plástico, materiais metálicos, madeira, vidro, material rochoso, papel, têxteis e outros. A percentagem de cada composto enunciado anteriormente não tem um valor exatamente estabelecido. R. Sarc observou que a composição deste combustível é bastante heterogênea, variando de lote para lote, mesmo em casos em que estes são adquiridos ao mesmo fornecedor; a sua composição e poder calorífico estão bastante dependentes da composição da porção de RSU introduzidos no processo [11]. Como mostrado por Shehata *et al.*, a composição dos RSU mundial é variável, fazendo com que a composição de CDRs produzidos pelo mundo também o seja [10]. Gerassimidou *et al.* apresentou os resultados da composição de CDRs de vários autores, mostrando as suas geografias. Pode ver-se que, para a Áustria, as composições apresentam diferenças significativas [12]. Pode ver-se, na figura 2.2, a composição dos RSU em várias regiões do mundo. É possível constatar que, apesar de a composição diferir ligeiramente em cada região a maior parte (exceto nos países membros da OCDE) é constituída por desperdícios alimentares, seguidos por plástico. Nos países da OCDE, esta tendência inverte-se.

2.1.2. Classificação de CDRs

A classificação dos CDRs é realizada mediante o seu poder calorífico, teor de humidade e composição de cinzas. São classificados como CDRs quando o poder calorífico é superior a 15 MJ/Kg, humidade inferior a 25% e percentagem de cinzas inferior a 20%, ou como CDRs-Q quando o poder calorífico é superior a 20 MJ/Kg, humidade inferior a 18% e composição de cinza inferior a 15% [13].

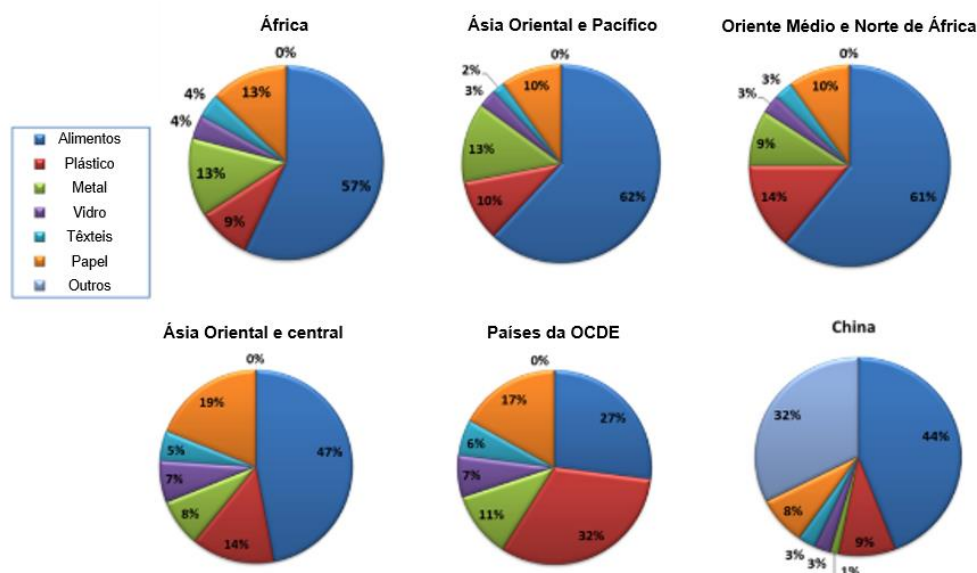


Figura 2.2 - Composição do RSU em várias regiões do mundo. Créditos da imagem atribuídos a [10].

2.1.3. Classificação de SRFs

Solid Recovered Fuel (SRF) é um tipo de combustível derivado de resíduos. Contrariamente aos CDRs, os SRFs podem ter 125 classificações possíveis, que derivam de três parâmetros: poder calorífico inferior, composição de cloro e o calor médio e o 80º percentil de composição em mercúrio, sendo que cada um destes indicadores pode ser classificado com valores de 1 a 5 [14]. Estas classificações têm o objetivo de representar um indicador económico e um indicador operacional, respetivamente [15] [16].

2.2. Produção de Combustíveis através de Desperdícios Sólidos Urbanos

A matéria-prima usada para a produção de CDRs são os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados pela população mundial nas suas atividades do quotidiano. O produto final é obtido através da submissão dos CDR a tratamentos mecânicos com o objetivo de homogeneizar a composição dos mesmos, reduzir teor de humidade e aumentar o PCI [11].

2.2.1. Combustível Derivado de Resíduos

A produção de CDRs é realizada usando a parte com poder calorífico elevado dos resíduos sólidos municipais e a constituição da matéria-prima tem uma grande influência nas características de qualidade do combustível obtido [17]. Na sua produção, os resíduos são sujeitos a processos de trituração e os materiais desinteressantes são removidos [18].

Os tratamentos mecânicos ou biomecânicos são um método eficaz para a produção deste tipo de combustíveis. É introduzido no processo uma porção de Resíduos Sólidos Urbanos, constituídos por papel, cartão, têxteis, plásticos, desperdícios alimentares, materiais metálicos, cerâmicos, rochosos e vidros. Devido aos quatro últimos tipos de materiais enunciados serem indesejados, tenta-se que o material introduzido no processo seja o mínimo constituído por estes possíveis. Desta forma, maximiza-se o aproveitamento do processo. Devido a ser impossível que a porção destes constituintes seja nula, um dos objetivos, ao projetar-se uma linha de produção de CDRs, é a extração destes materiais. Os restantes são a redução das dimensões dos materiais e a separação do combustível final em granulometrias, classificando-se a qualidade do produto final.

A sequência de fases a que os RSU são sujeitos depende do produto e das características do combustível que se pretende obter [18]. Infiesta *et al.* apresentou um projeto de uma linha de produção deste CDRs. Para se conseguir reduzir a dimensão do material, foram introduzidos britadores. Para a extração de constituintes indesejados, utilizam-se separadores magnéticos, Eddy Currents e por ar. Os dois primeiros enunciados têm o objetivo de extrair material metálico. Já o último pretende realizar a extração de material rochoso, vidros e cerâmicos. Para se lidar com o problema da humidade, um secador, com o objetivo de evaporar a água do combustível final [19]. Pode ver-se a esquematização de uma linha de produção de CDRs, na figura 2.4.

É após a produção que se dará o formato ao combustível. O formato final será bricks para o caso do material que após separação têm dimensões elevadas. Os fluffs são produzidos para partículas de dimensão reduzida após a mesma separação. Pellets são produzidos com as partículas de dimensão reduzidas compostas por RSU e plantas. Na figura 2.3, é possível ver os formatos dos tipos de pellets referidos [20].



Figura 2.3 - Formas de produção de CDRs. Pode ver-se em *fluffs* (esquerda), *pellets* (centro) e *bricks* (direita).

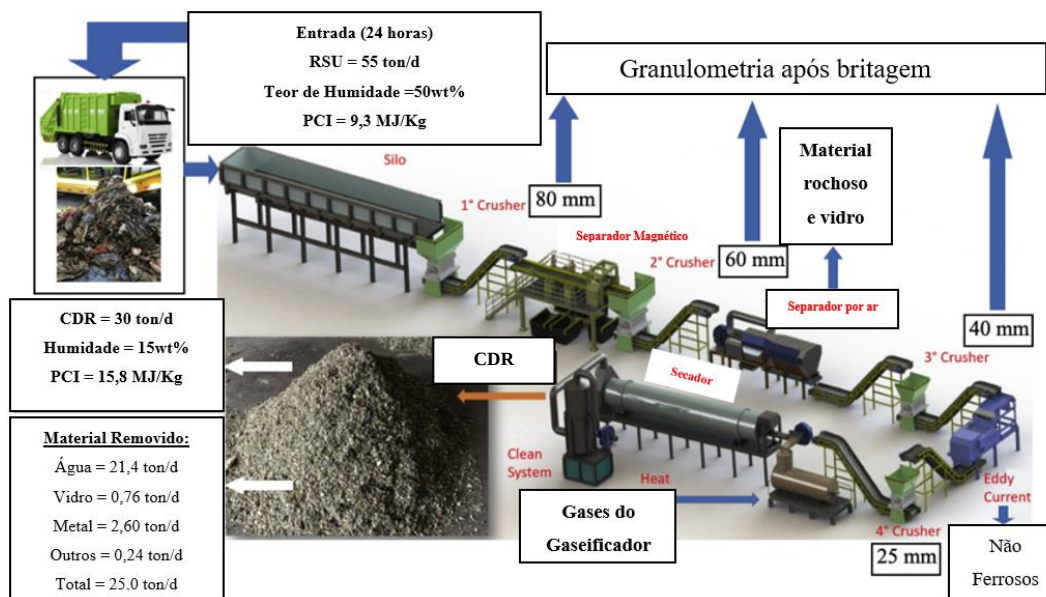


Figura 2.4 - Esquema da linha de produção de CDRs projetada e analisada em [19].

A instalação do mesmo tipo de equipamento várias vezes não é redundante; devido à complexidade da composição da matéria-prima, a repetição de fases é necessária para a obtenção de combustível com qualidade e uniformidade da composição [17].

2.2.2. Rendimento do Processo de Produção de CDRs

A massa de CDRs obtida através do processo é cerca de metade da matéria-prima introduzida no processo, os materiais inertes são cerca de 25% e obtém-se cerca de 7% de materiais metálicos [21]. Na figura 2.5, relaciona a taxa de recuperação de material com o seu poder calorífico. Para a instalação descrita em [19], constatou-se que a massa de CDRs produzida é cerca de metade da matéria-prima inserida no processo e que o poder calorífico aumentou de 9,3 MJ/Kg para os 15,8 MJ/Kg [19].

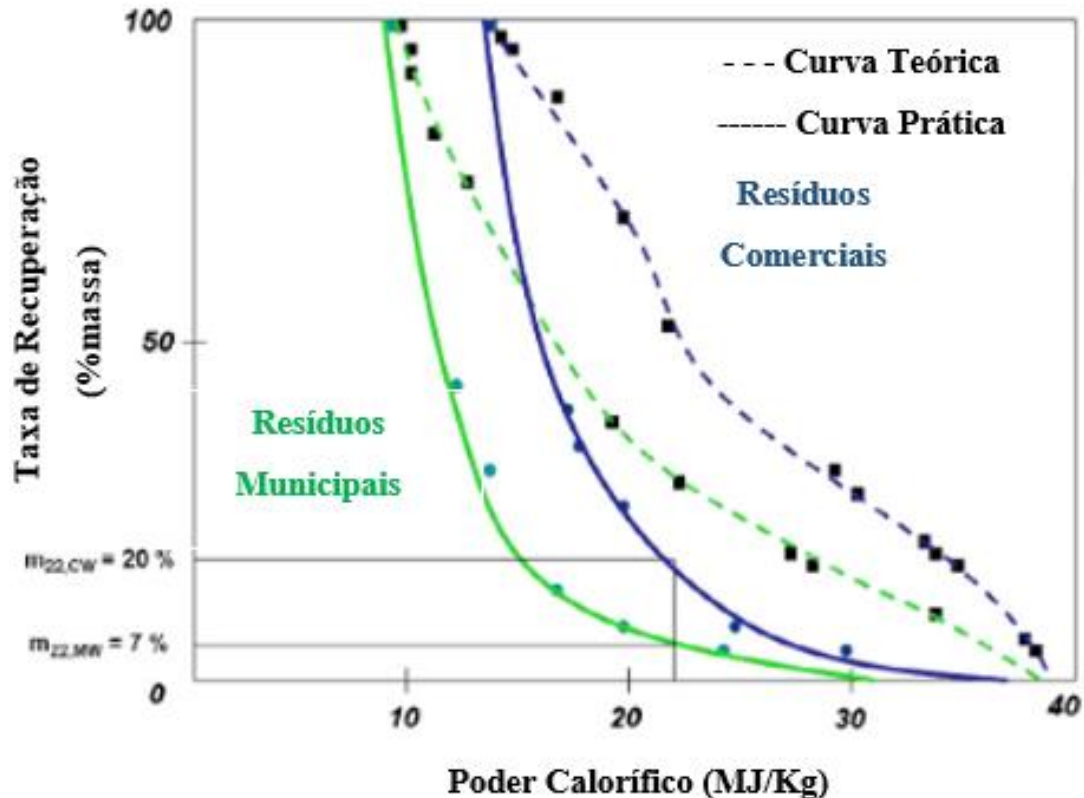


Figura 2.5 - Gráfico com relação entre taxa de recuperação e poder calorífico obtido em [17].

2.2.3. Produção de Solid Recovered Fuel

O processo de produção de SRFs é semelhante ao de CDRs, sendo realizado através de tratamento mecânico (ver figuras 2.6 e 2.7). Estes são produzidos a partir de Desperdício Comercial e Industrial (DCI). Existem fases de redução de dimensão através de britadores, fases de extração de componentes indesejados, através de separadores magnéticos, *eddy current* e separador por ar e secagem do combustível. Na produção de SRFs, realiza-se ainda a separação das dimensões do material através de peneiramento e utiliza-se o *Near Infra-Red* para separação de compostos indesejados, como o PVC, elastômeros ou resíduos alimentares que contenham cloreto de sódio de forma a se eliminar o cloro do combustível final [22]. Este processo consegue garantir a separação dos SRFs nas 125 classificações, aumentar o poder calorífico e remover cloro. Os produtos obtidos serão SRFs, Fração de Finos, *Heavy Fraction* e Rejeitados.

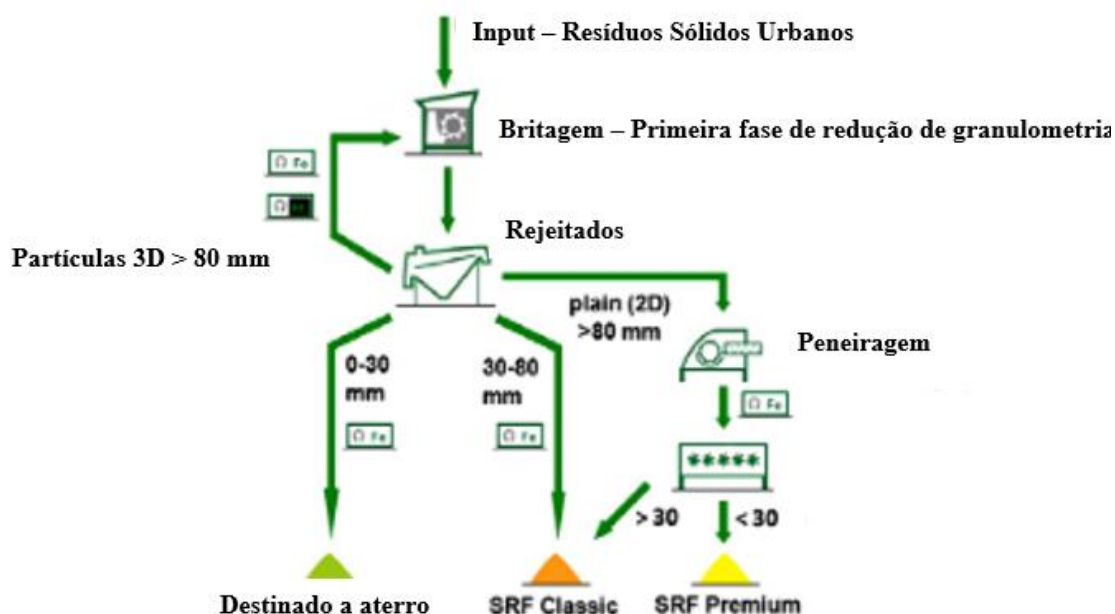


Figura 2.6 - Esquematisação do processo de produção de *Solid Recovered Fuels* e suas classificações por granulometria [17].

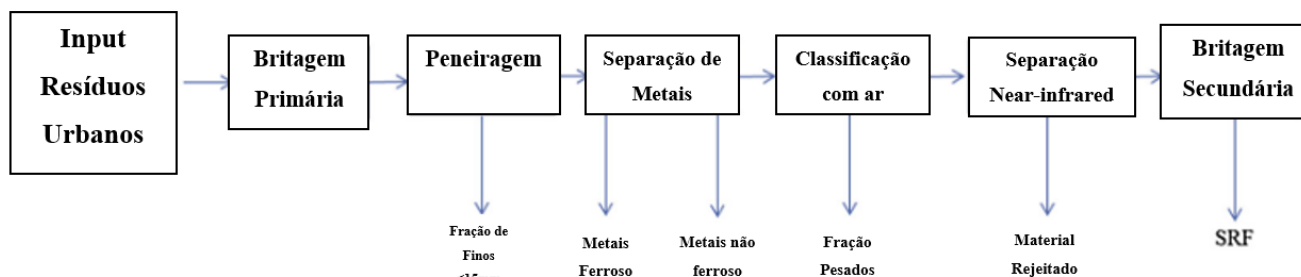


Figura 2.7 - Esquematisação dos processos mecânicos usados na produção de SRFs [17].

2.2.4. Rendimento do Processo de Produção de SRF

Nasrullah *et al.* conseguiu recuperar 75% da energia do material introduzido, sendo que obteve poder calorífico de SRFs de 25 MJ/Kg. Já o material rejeitado tem um poder calorífico de 16,6 MJ/Kg [22], que é superior ao poder calorífico dos CDRs produzidos na linha descrita na figura 2.4 [19]. A explicação para isto deve-se à massa de material rejeitado ser constituído, em grande parte, por elastômeros e PVC, componentes com elevado poder calorífico, mas rejeitados pela espectroscopia Near-Infrared (NIR) devido ao teor de cloro na sua constituição. Do total de cloro introduzido no sistema, estudos concluíram que 60% se encontrou nos SRFs e 35% nos rejeitados [23]. Para a mesma proporção de arsénio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), concluiu-se, ainda, que a composição nos SRFs é de 32%, 46%, 58% e 45%, respetivamente.

2.3. Tecnologias *Waste to Energy*

As tecnologias *Waste to Energy* (WtE) têm vindo a ser cada vez mais procuradas devido à possibilidade oferecida de juntar a produção de energia elétrica à eliminação do volume de resíduos de 75% a 90% [24]. Em média, são incinerados mundialmente 216 milhões de toneladas, por ano, de RSU; apenas 15% destes entram em WtE. Entre 2020 e 2023, mais de 200 centrais preparadas para WtE irão ser instaladas globalmente [24].

A grande diferença identificada no processo de WtE é a utilização de RSUs como combustível em substituição dos fósseis, sendo que o modo do processo em si não acarreta grandes alterações [25]. A utilização dos CDRs e SRFs neste processo é eficiente devido ao seu poder calorífico ser superior aos resíduos não tratados [26] e já são vários os processos utilizados em vários países para a valorização dos CDRs, como inceneração, co-incineração, gaseificação e leito fluidizado [27].

2.3.1. Inceneração e co-incineração

A inceneração é um modo de produção de energia elétrica que permite a redução do volume dos resíduos, usando-os como combustível, assim como eliminar micro-organismos causadores de doenças que estes contêm. O processo de co-incineração difere deste na medida em que utiliza mais do que um combustível.

Uma instalação dedicada à incineração é composta por várias fases, que podem ser vistas na figura 2.8 [28]:

Receção e Armazenamento – Engloba a fase onde os camiões de abastecimento descarregam e o combustível é armazenado em silos e/ou *bunkers* [29].

Pré-tratamento – Inclui os equipamentos que retiram o material inerte. A utilização de CDRs permite saltar esta etapa [29].

Abastecimento Combustível ao Processo – Equipamentos e tecnologias responsáveis por transportar o combustível do armazenamento à câmara de combustão. Pode ser realizado através de rolos, transporte por arrasto ou pneumático [29].

Recuperação Energética – Constituído por um sistema de ciclo de Rankine com o objetivo de produzir energia elétrica. Os RSU/CDRs incinerados produzem calor que farão um fluido atingir o ponto de ebulição. O fluido gasoso irá mover uma turbina que produzirá energia elétrica, e depois irá perder calor através da permuta com outro sistema [30].

Gestão de Resíduos – Equipamento que constitui o sistema de extração e tratamento de cinzas e gases expelidos [29]. Costa *et al.* analisou uma central dedicada à inceneração de CDRs capaz de incinerar 12 toneladas de CDRs por hora e fornecer 11 MW em energia elétrica e 47 MW de energia térmica.

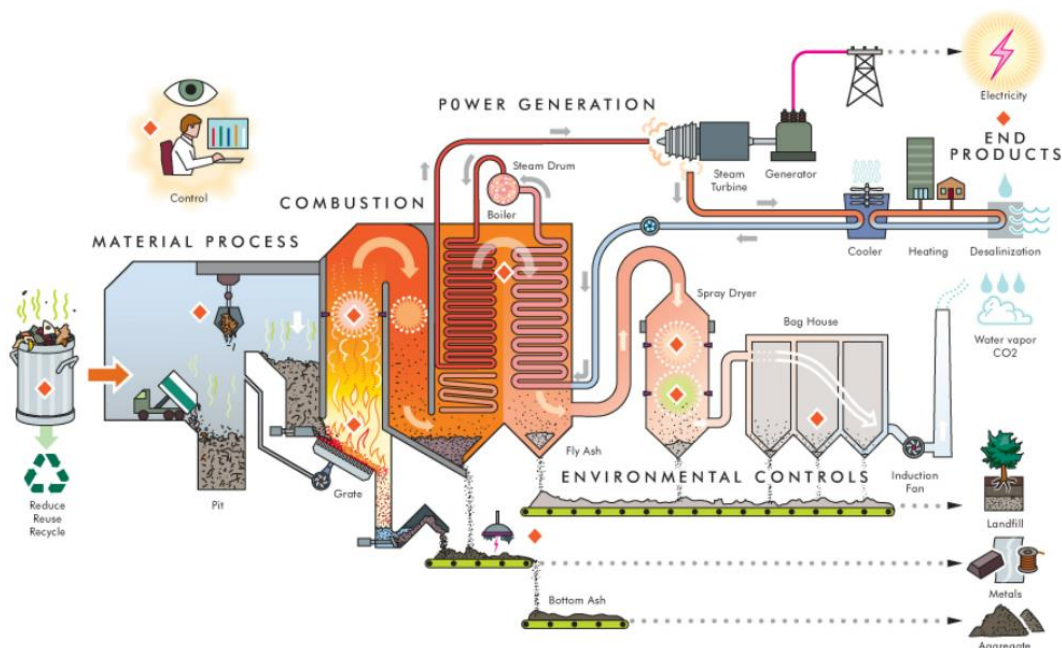


Figura 2.8 - Sistema de combustão de CDRs para produção de energia elétrica. Elaborado por [28].

2.3.2. Gaseificação

O processo de gaseificação de CDRs tem como vantagem a produção de gás sintético usado para produzir energia com a vantagem de usar um combustível alternativo aos fósseis. Dejtrakulwong *et al.* dividiu o processo de gasificação em quatro módulos, como os que se podem ver na figura 2.9, sendo eles módulos de secagem, pirólise, oxidação e redução. Este é um processo que passa um combustível no estado líquido ou sólido para o estado gasoso.

No módulo de secagem, é introduzido o combustível no estado sólido ou líquido. Através do calor introduzido no módulo de oxidação, o teor de humidade do material irá evaporar. O material seco passa para o estágio de pirólise, onde se irá decompor em gases voláteis e carvão. Estes produtos irão ser transferidos para o estágio de oxidação, onde existe a entrada de ar no processo, que, ao reagir, fornecem calor ao processo. No fim, vem o estágio de redução, sendo através destas que se obtém o combustível final [31].

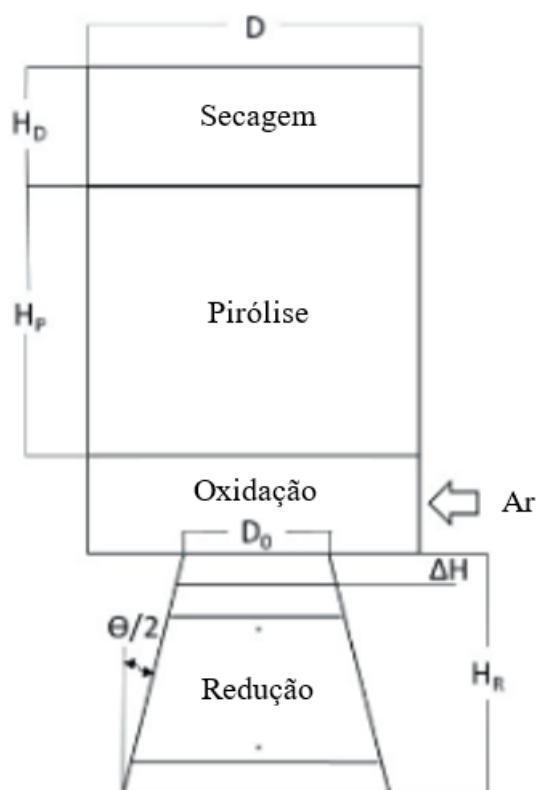


Figura 2.9 - Esquematização de reator para prática de gaseificação de CDRs esquematizado por [31].

Relativamente aos CDRs, a secagem está dependente da temperatura, entre os 100 e os 150° C, velocidade dos gases e superfície de contacto, alimentação, modo de fornecimento dos CDRs (*fluffs*, *pellets*, etc.). No estágio da pirólise, são separados o carbono e as cinzas do vapor de água, líquidos orgânicos e dos gases não condensáveis. Os produtos voláteis (como água, dióxido de carbono e hidrogénio) e o carvão sofrerão uma segunda fase de gaseificação e é desta que se formará o *syngas* (*synthesis gas*) final [32].

2.3.3. Leito fluidizado

Este processo decorre no interior de uma caldeira preenchida com um material granular inerte. Neste sistema, dá-se a injeção de um fluido (geralmente ar) que fará a suspensão das partículas. O ar é injetado pela parte inferior da caldeira (ar primário) e pelas paredes laterais (ar secundário). É, então, feita a injeção do combustível pela parte inferior da caldeira, que irá reagir com o ar inserido no sistema. Como a gaseificação, a utilização de CDRs, neste processo, tem a vantagem de aproveitar resíduos para produção de energia [33].

Esta tecnologia foi desenvolvida visando o aproveitamento de combustíveis com baixo poder calorífico. Atualmente, existem duas variantes desta, sendo *bubbling fluidized bed* (BFB) e *circulating fluidised bed* (CFB). O BFB requer que as dimensões das partículas de combustível sejam inferiores a 50 mm. A reação com o combustível é realizada na direção ascendente, através do ar primário. As paredes da caldeira são revestidas por refratário, que limitam as perdas de calor para o exterior e

potencia as trocas de calor entre partículas. Assim, esta tecnologia é menos sensível a variações no teor de combustível. A remoção das cinzas é realizada através dos gases, que entrarão num circuito de ciclones (onde será retirado a maior parte das cinzas e partículas arrastadas) e, posteriormente, através de eletrofiltros ou filtros de mangas. No sistema CFB, as dimensões das partículas de combustível têm de ser inferiores a 25 mm. A grande diferença no modo de combustão para o processo anterior é a velocidade de introdução de ar mais elevada, fazendo com que a transferência de calor entre partículas diminua ao longo da caldeira. No entanto, a temperatura, neste sistema, é superior, visto ser utilizado com combustíveis mais eficientes. A separação das partículas é totalmente retirada através de ciclones. Serão, posteriormente, arrefecidas e reintroduzidas no sistema [33].

Um esquema de uma estação de combustão CFB pode ser visto na figura 2.10. Na tabela 2.1, estão apresentados vários parâmetros relativos à tecnologia CFB e BFB.

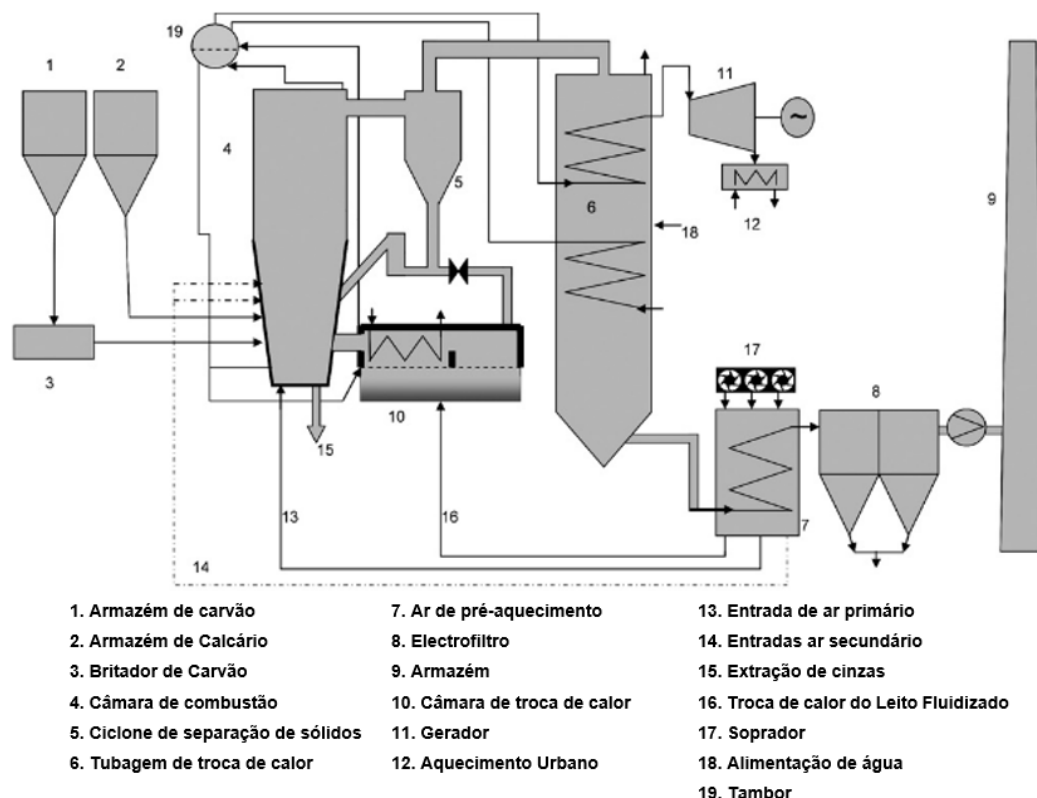


Figura 2.10 - Esquema de estação de combustão por leito fluidizado do tipo CFB. Adaptado de [33].

Tabela 2.1 - Parâmetros comparativos entre os tipos BFB e CFB [33].

Parâmetros de Design	BFB	CFB
Temperatura da Combustão (°C)	760 - 870	800 - 900
Dimensão Partículas do Combustível (mm)	0 - 50	0 - 25
Velocidade de Fluidificação (m/s)	1 - 3	3 - 10
Circulação de Sólidos	Não	Sim
Caudal do vapor de água (Kg/s)	13 - 139	12 - 360
Temperatura do vapor de água (°C)	150 - 543	180 - 580
Pressão do vapor de água (bar)	10 - 160	10 - 275

2.4. Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos

A gestão dos RSU está dependente de questões políticas, socioeconómicas, volume de resíduos e volume de resíduos gerados [34]. Foram geradas, na Europa, cerca de 247 milhões de toneladas de RSU, sendo que, nos EU15, cada habitante produziu, em média, 523 Kg [35].

2.4.1. Europa

A preocupação com a gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos tem vindo a aumentar na Europa, sendo que os países membros têm vindo a adotar os métodos de tratamento mecânico e biomecânico como alternativa à deposição em aterro [36]. Este combustível pode ser bem aproveitado pela indústria cimenteira e incineradores dedicados.

Até 2015, o investimento na produção de CDRs não era elevado em Portugal, sendo que, das 4765 Mton de RSU produzidas, 23% foram enviadas para tratamento biomecânico e 10% para tratamento mecânico. Dos 15 sistemas de gestão de resíduos em Portugal a operar nesse ano, apenas sete enviaram material para a produção de combustível, tendo sido enviadas 107.623 ton e obtidas apenas 29.770 ton [37]. O número de sistemas de gestão de resíduos, em Portugal, aumentou para 23. Ainda assim, a percentagem de material a ser enviada para tratamento mecânico caiu para cerca de 5%, a percentagem de resíduos para aproveitamento energético diminuiu, em 2020, e a percentagem de resíduos a serem enviados para aterro tem vindo a aumentar; mesmo assim, é inferior ao valor de 2010 [38]. Pode ver-se a evolução da gestão de RSU, em Portugal, entre 2010 e 2020, na figura 2.11.

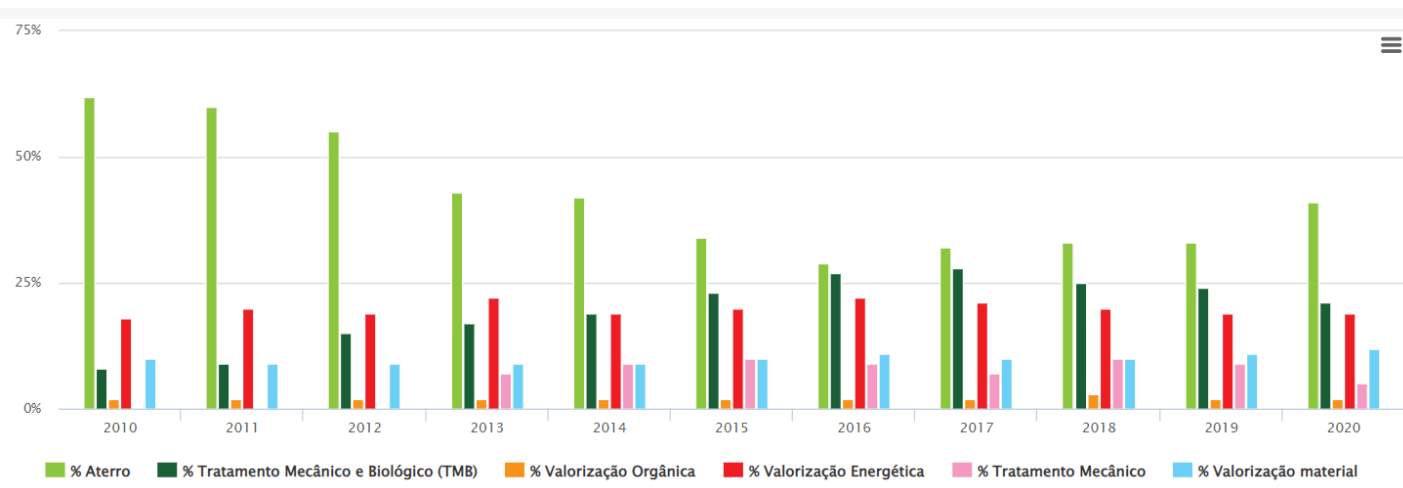


Figura 2.11 - Gráfico com demonstração da gestão dos RSU, em Portugal, entre 2010 e 2020. Gráfico retirado de [38].

Na Europa, o mercado de CDRs tem vindo a crescer e é esperado que assim se mantenha. É apontada entre 2021 e 2031 uma taxa de crescimento anual de 3,5% [39]. Em 2015 existiam, nos países a norte da Europa, 383 plantas dedicadas à combustão de resíduos para WtE. Quanto ao tratamento mecânico, a Alemanha aparece em primeiro lugar com 63 instalações, seguida pelo Reino Unido com 36 e é, ainda, o país europeu com maior percentagem de reciclagem dos RSU, com 47%, seguido da Eslovénia (42%) e Irlanda (37%) [35]. A exportação de CDRs, por parte da Inglaterra, entre

2011 e 2015, aumentou de 250.00,00 ton/ano para 3,4 milhões ton/ano, fazendo parte deste mercado, países como a França, Alemanha, Bélgica, Noruega, Suíça e Dinamarca [40]. Foi exportada do Reino Unido para a Alemanha uma quantidade superior a 600 kTon/ano, entre 2013 e 2018. Para a Noruega, o valor é inferior, mas, ainda assim, está entre as 300 e 600 kTon/ano. O maior consumidor deste combustível, na Europa, é a Alemanha (> 8 milhões de Tons), seguiu pela Inglaterra (> 3 milhões de Tons) e Itália (perto dos 2 milhões de tons) [41].

Na tabela 2.2, está discriminada a geração de RSU, em vários países da Europa, e o destino que é dado a uma proporção desses mesmos resíduos.

Tabela 2.2 - Destino atribuído aos RSU em vários países da Europa. Adaptado de [41].

	Desperdícios Urbanos Gerados (Kg/Pessoa)	Desperdícios Urbanos Tratados (Kg/Pessoa)	Tratamento Resíduos Municipais %				
			Reciclado & Compostagem	Reciclagem	Compostagem	Aterro	Incineração
EU	492	480	42	27	15	34	24
Bélgica	456	458	57	36	21	1	42
Bulgária	460	433	27	24	3	73	0
República Checa	308	308	24	21	3	57	20
Dinamarca	668	668	45	32	13	3	52
Alemanha	611	610	65	47	18	0	35
Estónia	279	220	40	34	6	44	16
Irlanda	570	570	45	37	8	39	16
Grécia	503	493	18	16	2	62	0
Espanha	464	464	27	17	10	63	10
França	534	534	39	23	16	28	33
Croácia	391	381	16	14	2	85	0
Itália	529	523	38	24	14	41	20
Chipre	663	663	21	12	9	79	0
Letónia	301	301	16	14	2	84	0
Lituânia	469	458	21	19	2	79	1
Luxemburgo	662	662	47	28	19	18	36
Hungria	402	402	26	21	5	65	9
Malta	589	559	13	9	4	87	0
Holanda	551	561	50	24	26	2	49
Austria	552	528	62	28	34	3	35
Polónia	314	249	25	13	12	75	1
Portugal	453	453	27	12	15	54	20
Roménia	389	313	1	1	0	99	0
Eslováquia	362	301	47	42	5	51	2
Eslovénia	324	313	13	6	7	77	10
Finlândia	506	506	34	22	12	33	34
Suíça	462	462	47	32	15	1	52
EUA	472	465	46	28	18	37	17

Em França, foi publicado o decreto No. 2016-630 a 19 de maio de 2016, que serve atualmente para definir Combustíveis Sólidos Recuperados (CSR); semelhantes aos CDRs mas com valores de poder calorífico, cloro e mercúrio inferiores. A produção deste neste país, no ano de 2015, esteve entre as 230 e 800 kTon, e registou-se um consumo de cerca de 275 kTons [41].

A lista de países cujos RSU são enviados para aterro na Europa é liderada pela Roménia, Malta e Croácia, com 99%, 87% e 85%, respetivamente [35].

Na Grécia, a produção de CDRs/SRFs começou em 2006 e tem vindo a aumentar, sendo as grandes cidades as com maior produção e destacando-se Atenas (figura 2.12) [42].

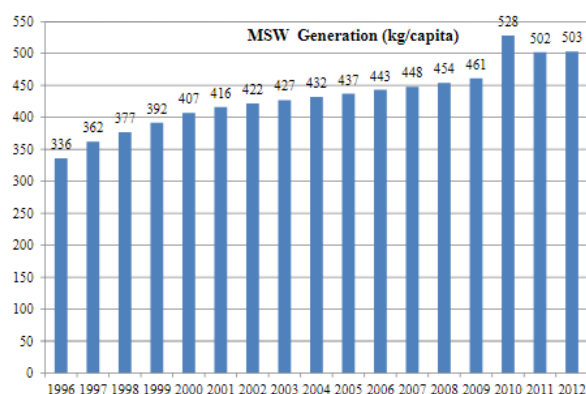


Figura 2.12 - Representação da evolução da geração de desperdícios na Grécia entre 1996 e 2012, em Kg/Capita [42].

2.4.2. Ásia

Em 2018, foram geradas, na China, cerca de 228 Mton de RSU, sendo que 47% destes foram gerados na costa oriental do país; o destino dado a 52% destes resíduos foi o aterro e 45% foi incinerado [43]. Segundo Yin Ding *et al.*, foi implementada, na China, a primeira legislação para classificação de RSU, em abril de 2010. Na tabela 3, é possível ver a composição dos CDRs, na China, por regiões.

Tabela 2.3 - Composição dos RSU em várias regiões da China [43].

Cidade	Ano	Composição (%)									
		Desperdícios alimentares		Borracha, Plástico e Papel		Têxteis e Madeira		Poeira Cerâmica		Vidro Metal Outros Mistura	
Shanghai	2016 (Cheng and Dong, 2017)	60.40	11.88	17.56	2.85	1.95	0.02	0.41	3.57	1.08	0.09
	2015 (Cheng and Dong, 2017)	61.10	12.07	16.57	2.57	4.52	0.02	0.44	2.10	0.51	0.07
	2014 (Cheng and Dong, 2017)	65.07	10.58	15.99	2.03	2.70	0.08	0.45	2.31	0.54	0.14
	2013 (Cheng and Dong, 2017)	62.21	12.66	16.56	2.14	1.49	0.05	0.14	2.29	0.35	0.02
	2012 (Cheng and Dong, 2017)	64.97	9.57	15.71	2.31	2.69	0.00	0.53	2.53	0.33	0.05
	2011 (Cheng and Dong, 2017)	61.66	13.31	17.11	2.12	1.60	0.12	0.45	2.98	0.32	0.21
	2010 (Cheng and Dong, 2017)	63.51	11.90	16.75	2.29	1.48	0.01	0.35	3.03	0.48	0.07
	2009 (Cheng and Dong, 2017)	63.69	11.71	16.66	2.38	1.24	0.06	0.51	2.84	0.52	0.06
	2008 (Cheng and Dong, 2017)	63.47	10.19	18.26	2.57	1.09	0.10	0.46	2.50	0.34	0.05
	2007 (Cheng and Dong, 2017)	67.37	9.01	15.67	2.58	1.10	0.19	0.44	2.35	0.50	0.05
Hangzhou	2010 ^a	56.80	9.31	19.09	3.05	1.92	—	—	1.40	0.46	3.85
	2008 (Zhou, 2010)	52.96	6.66	5.71	4.00	12.27	5.01	4.50	2.72	4.02	0.05
	2004 (Zhuang, 2007)	64.24	6.95	15.29	2.13	1.21	5.58	1.53	2.16	0.91	—
	1997 (Li et al., 2001)	58.19	3.68	7.63	2.23	1.20	—	—	2.09	0.98	—
Tianjin (city center)	2012 (Wei, 2013)	63.22	11.74	14.63	—	—	3.89	—	—	—	6.52
	2011 (Wei, 2013)	63.18	12.16	15.05	—	—	3.41	—	—	—	6.20
	2010 (Wei, 2013)	65.45	11.07	13.95	—	—	3.81	—	—	—	5.72
	2009 (Wei, 2013)	63.42	11.24	13.30	—	—	5.26	—	—	—	6.28
Xiamen	2008 (Wei, 2013)	58.46	10.44	14.05	—	—	9.15	—	—	—	7.90
	2006 (Lin, 2009)	65.28	3.50	11.38	0.99	0.83	0.85	1.01	2.57	0.53	11.78
	2005 (Lin, 2009)	62.57	3.95	11.49	1.54	0.96	1.99	0.84	3.12	0.80	11.26
	2004 (Lin, 2009)	65.62	3.09	10.36	1.51	0.57	4.79	2.14	2.18	0.65	4.35
Nanjing	2008 ^a	52.83	9.32	12.26	2.05	1.54	11.49	7.15	2.44	0.92	—
	2014 (Chen, 2011)	61.57	8.96	12.59	7.70	7.08	1.80	—	—	0.30	—
	2011 (Lai, 2012)	31.25	8.36	21.86	13.44	10.32	—	—	3.10	0.37	11.20
	2009 (Chen, 2011)	54.66	8.39	19.96	10.28	1.12	—	1.69	1.34	0.33	2.20
Guangzhou	2008 (Chen, 2011)	52.49	9.22	22.10	8.72	1.15	—	2.11	1.38	0.25	2.55
	2007 (Chen, 2011)	52.33	8.00	19.46	10.35	1.68	—	2.04	1.67	0.38	3.43
	2006 (Chen, 2011)	58.11	8.62	16.92	6.67	1.22	—	1.62	1.17	0.27	5.32
	2005 (Chen, 2011)	52.43	7.92	18.96	8.81	2.57	—	3.15	1.58	0.32	4.17
Jinan	2004 (Chen, 2011)	56.33	6.88	17.23	5.88	2.49	—	2.96	1.59	0.32	5.97
	2012 (Li and Zheng, 2014)	58.71	11.18	9.92	3.04	0.95	10.77	0.06	1.26	0.31	0.11
	2011 (Li and Zheng, 2014)	60.05	8.40	10.14	1.27	0.30	15.27	0.15	1.03	0.65	0.53
	2010 (Li and Zheng, 2014)	54.71	12.78	9.63	2.11	2.03	11.37	0.63	0.86	0.24	0.98
Shenyang	2009 (Li and Zheng, 2014)	55.44	10.66	9.76	1.89	1.42	12.18	0.95	1.03	0.35	0.56
	2008 (Ma, 2010)	56.93	10.18	7.13	1.29	0.74	17.50	1.66	0.77	0.25	0.38
	2007 (Ren et al., 2011)	59.77	7.58	12.85	3.61	2.52	2.23	3.11	5.40	2.01	—
	2006 (Ren et al., 2011)	60.98	6.28	14.55	3.05	1.49	6.13	1.99	1.98	2.20	1.35
	2006 (Ren et al., 2011)	73.95	6.06	10.29	2.87	0.60	1.88	1.51	2.25	0.50	0.09

Em 2012, na Arábia Saudita, existia um potencial para gerar 319,4 MW de energia derivado da

inceneração de CDRs, valor que se esperava crescer para 699,76 MW em 2035, devido ao aumento populacional e consequente aumento da produção de CDRs, que foi de 15,3 milhões de toneladas em 2014 (1,4 Kg/capita/dia) (figura 2.13) [44]. No entanto, apesar do seu potencial para a produção WtE, não se recorre a esta prática, sendo que se realiza apenas reciclagem de metal e cartão [45].

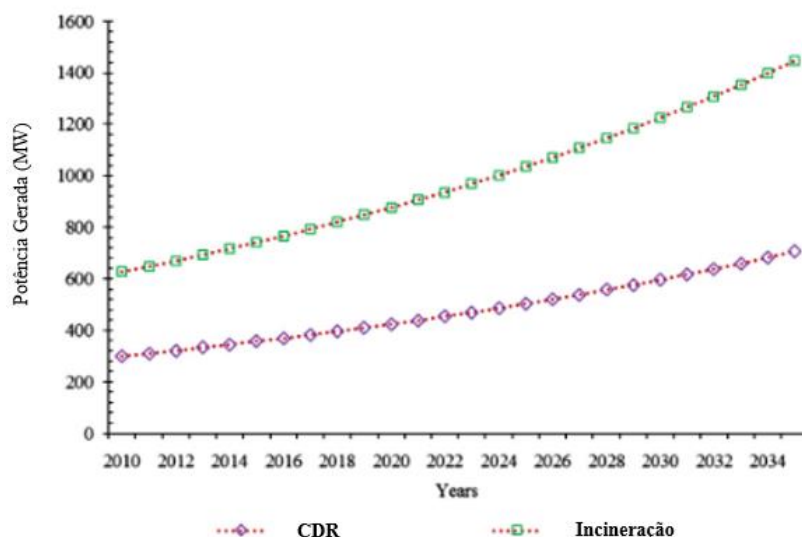


Figura 2.13 - Gráfico com o potencial de utilização de RSU para a produção de energia entre o ano de 2010 e 2034 na Arábia Saudita [44].

Em 2005, já existia preocupação com processos de WtE, na Índia, sendo que, neste ano, foram completos 27 projetos de plantas de pirólise, utilizando-se RSU, com capacidade para produzir 45,44 MW [46]. Foram criadas instalações de produção de CDRs em mais de oito cidades [47]. A preocupação com este tema deriva de fatores, como a falta de espaço no país para a deposição dos resíduos, aliados à elevada população em crescimento e à emissão de gases de efeito de estufa oriundos de uma gestão de RSU sem critério [48]. Entre 2008 e 2012, o número de aterros aumentou oito vezes, enquanto as produtoras de CDRs aumentaram sete vezes [49].

2.4.3. Estados Unidos da América

Os Estados Unidos da América aplicam métodos de gestão dos seus RSU: em 2004, o destino dos RSU foi 64% para aterro, 28,5% para reciclagem e 7,4% o envio para produção de energia, existindo 15 estações dedicadas à combustão de CDRs [50], [51]. Na tabela 2.4, pode ver-se o número de sistemas dedicados a WtE, nos Estados Unidos da América, por estados, e a sua capacidade.

Tabela 2.4 - Número de estações de WtE em vários estados dos Estados Unidos da América, e capacidade dos mesmos [50].

Estado	Nº Instalações	Capacidade (Ton/Dia)
Connecticut	6	5896.7
New York	10	10069.8
New Jersey	5	5624.5
Pennsylvania	6	7620.4
Virginia	6	7529.6
Florida	13	17508.9
Total	53	63140.1

Na figura 2.14, está esquematizada a preferência da gestão dada aos RSU, nos Estados Unidos da América. A deposição de RSU em aterro diminuiu, nos Estados Unidos, em 2015, sendo que este destino foi usado em 52,5% dos casos, a reciclagem, 25,8% e os métodos de WtE aumentaram para 12,8% [52]. Em 2018, o valor do destino a WtE manteve-se praticamente inalterado, sendo, aproximadamente, 12,6%; a evolução do tratamento dado aos RSU, nos Estados Unidos da América, em toneladas, para a gestão de RSU pode ser vista na figura 2.15 [53].

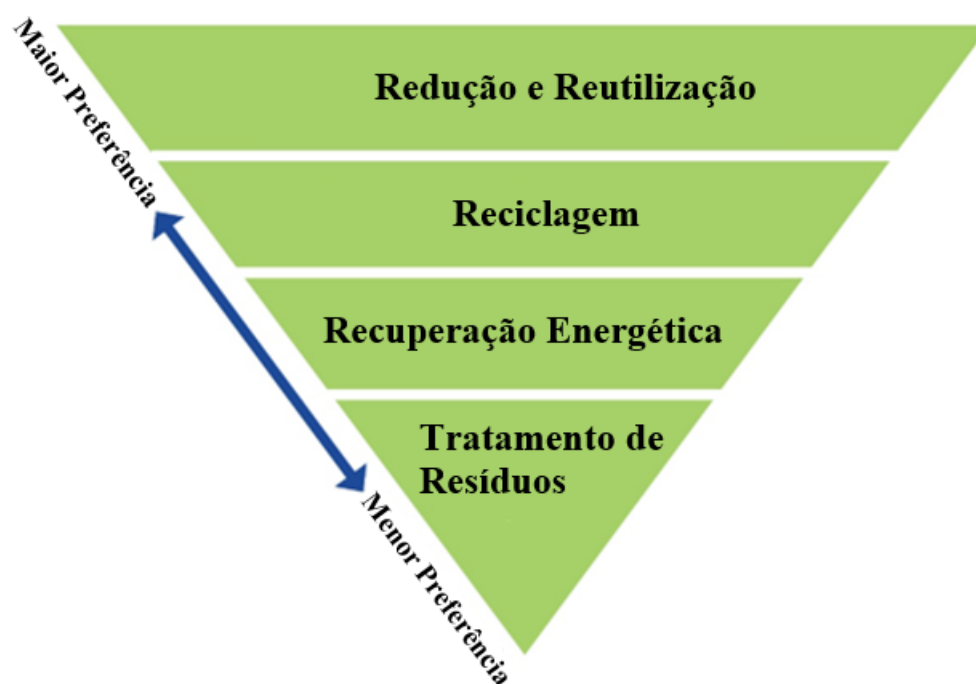


Figura 2.14 - Esquematização da preferência dada ao tratamento de RSU nos Estados Unidos da América [52].

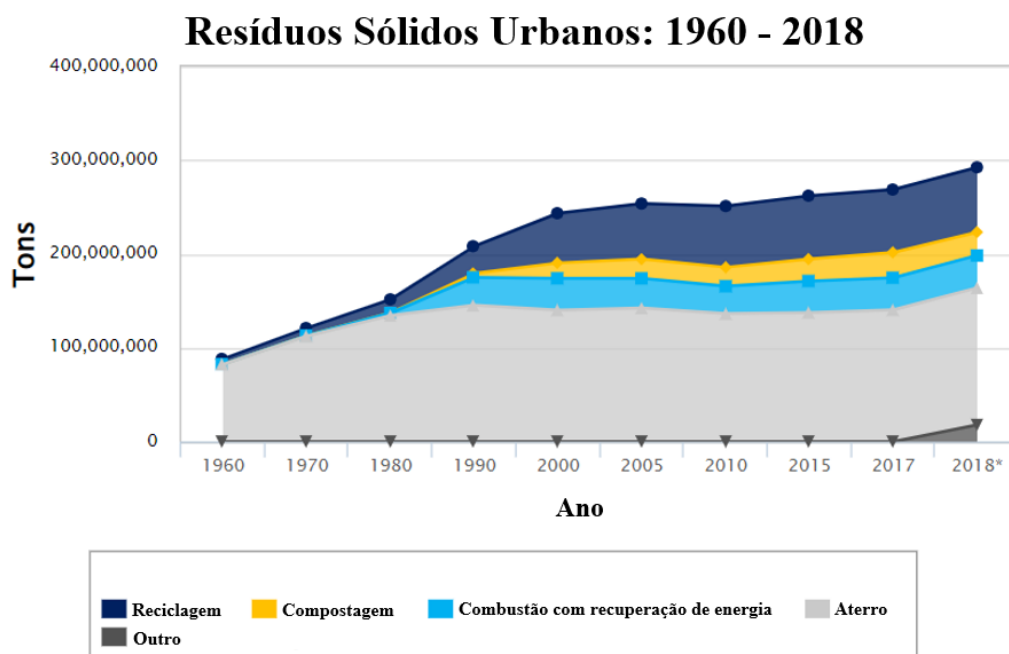


Figura 2.15 - Gráfico com evolução do destino dos RSU nos estados Unidos da América entre 1960 e 2018, em toneladas [53].

2.4.4. América Latina

Segundo o relatório de avaliação regional da gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na América Latina e Caraíbas, a produção de RSU, em 2010, *per capita*, foi inferior nesta zona do mundo do que em países europeus, e do que nos Estados Unidos da América. Os maiores valores nesta zona do globo para este parâmetro são entregues ao Chile, à Argentina e Brasil, por ordem (ver tabela 2.5). A separação dos resíduos pela composição não é realizada em grande escala, sendo que a esta data não era comum contarem com instalações de separação dedicadas [54]. No Brasil, o mercado de CDRs espera uma taxa de crescimento anual entre 2021 e 2031 de 4,6%, o que é superior ao mesmo parâmetro para o mercado mundial [39].

Tabela 2.5 - Geração de RSU em vários países da América Latina, em Kg/Habitante/Dia. Retirado de [54].

PAÍS	MICRO		PEQUENO		MÉDIO		GRANDE		MEGA		PAÍS	
	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU	RSD	RSU
Argentina	0,66	0,92	0,68	1,06	0,8	1,02	0,78	1,41	..	..	0,77	1,15
Belize	-	-	-	-	-	-	-	-	..	..	-	-
Bolívia	0,27	0,29	0,4	0,43	0,45	0,48	0,51	0,55	..	..	0,46	0,49
Brasil	0,49	0,87	0,54	0,86	0,66	0,85	0,78	1,31	0,91	1	0,67	1
Chile	0,75	1,28	0,76	1,43	0,8	1,21	0,86	1,12	..	..	0,79	1,25
Colômbia	0,41	0,48	0,4	0,55	0,56	0,57	0,59	0,66	0,73	0,82	0,54	0,62
Costa Rica	-	1,21	-	0,75	-	0,89	-	1,2	..	..	-	0,88
Equador	0,41	0,54	0,45	0,66	0,59	0,68	0,73	0,85	..	..	0,62	0,71
El Salvador	0,3	0,48	0,42	0,64	0,58	0,94	0,58	1,74	..	..	0,5	0,89
Guatemala	0,36	-	0,42	0,5	0,52	0,62	0,5	0,62	..	..	0,48	0,61
Guiana	-	-	-	-	-	-	-	-	..	..	-	-
Honduras	0,27	-	0,37	-	0,67	-	0,94	-	..	..	0,61	-
Jamaica	0,6	-	0,64	-	0,83	-	0,95	-	..	..	0,71	-
México	0,32	0,53	0,47	0,78	0,49	0,83	0,75	1,1	0,65	1,34	0,58	0,94
Nicarágua	-	-	0,7	-	0,57	-	1	-	..	..	0,73	-
Panamá	0,46	0,54	0,57	1,11	0,59	0,96	0,5	1,6	..	..	0,55	1,22
Paraguai	0,63	0,72	0,63	0,86	0,72	1,02	0,83	1,28	..	..	0,69	0,94
Peru	0,33	0,53	0,41	0,63	0,51	0,67	0,48	0,85	0,43	0,81	0,47	0,75
Rep. Dom.	-	-	0,9	1	0,75	1,01	0,9	1,2	..	..	0,85	1,1
Uruguai	0,72	0,85	0,67	1,07	0,46	0,81	0,88	1,22	..	..	0,75	1,03
Venezuela	-	0,5	0,77	0,78	0,51	0,75	0,82	1,08	..	..	0,65	0,86
ALC	0,45	0,75	0,53	0,8	0,61	0,84	0,74	1,14	0,73	1,01	0,63	0,93

2.5. CRDs na Indústria do Cimento

A indústria do cimento pratica a coincineração de CDRs em conjunto com combustíveis fósseis para a realização da calcinação e clínquerização [20]. Esta é uma forma de se dar um consumidor final a este produto, apoiando-se a redução da deposição dos RSU em aterro [55].

O interesse na substituição da proporção de combustíveis fósseis por CDRs tem vindo a crescer na indústria do cimento, tendo este base em fatores ambientais e económicos, sendo que se reduz o metano produzido pela decomposição de resíduos em aterro, se dá uma finalidade ao resíduo, apoiando a economia circular, e estes substituem os combustíveis fósseis [5]. A CEMBUREAU, Associação Europeia de Cimento, traçou planos que definiram a utilização de combustíveis alternativos aos fósseis numa proporção de 60% até 2030 e 90% até 2050 [6]. A Secil é um exemplo do investimento neste objetivo, em Portugal, com o projeto CCL – *Clean Cement Line* [7], um projeto de I&D atualmente em progresso cujo um dos objetivos é eliminar a dependência dos combustíveis fósseis [9].

Já se demonstrou que a utilização dos CDRs como combustível na indústria do cimento pode trazer benefícios, tanto a nível económico, como ambientais, sendo que, até ao momento da investigação, a utilização de 30% CDR traria uma poupança de 4.465.663,00 USD/ano (tabela 2.6) [56].

Tabela 2.1 - Simulação de modelos económicos de utilização de CDRs e efeitos numa indústria de cimento [56].

Parâmetros	Opção 0	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Opção 4	Opção 5	Opção 6
Substituição de CDRs (%)	0	5	10	15	20	25	30
Rácio Consumo <i>Petcoke</i> (%)	100	95	90	85	80	75	70
Consumo <i>Petcoke</i> (ton/h)	15,9	14,15	13,41	12,66	11,92	11,17	10,43
Consumo CDRs (ton/h)	0	1,6	3,28	4,92	6,56	8,2	9,84
Tons <i>Petcoke</i>	0	12.600	17.928	23.328	28.655	34.056	39.384
Poupança <i>Petcoke</i> (USD/ano)	0	1890000,00	2689200,00	3499200,00	4298400,00	5108400,00	5907600,00
Poupança de Emissões CO ₂ (ton/ano)	0	8820,00	12550,00	16330,00	20059,00	23839,00	27569,00
Poupança de Emissões CO ₂ (USD/ano)	0	132300,00	188244,00	244944,00	300888,00	357588,00	413532,00
Custo Produção de CDRs (USD/ano)	0	279245,00	572452,00	858677,00	1144904,00	1431130,00	1717356,00

2.6. Automação

O termo automação foi usado pela primeira vez, em 1936, e referia-se ao transporte de peças em fabrico entre máquinas e equipamentos de um processo sem a necessidade de existir intervenção de operadores. Esta ideia evoluiu quando, em 1955, J. Diebold usou o termo para aliar esta integração com a autorregulação dos equipamentos através da utilização de *feedback*. O desenvolvimento e implementação da automação teve o grande crescimento após a Segunda Guerra Mundial com o surgimento da tecnologia de controlo numérico e, posteriormente, com o aparecimento da cibernética, estudo de processos de controlo e comunicação entre sistemas mecânicos, elétricos e químicos [57].

Com o desenvolvimento computacional, também cresceu a automação e, neste momento, esta define-se como a capacidade de um processo se autogerir através da sua capacidade de decisão, sem necessitar de intervenção humana [58]. Em contrapartida, a par desta redução do número de pessoas a operar o processo produtivo, crescerá a procura de pessoas especializadas de forma a se conseguir realizar a implementação de nova tecnologia no sistema produtivo [59].

Atualmente, as empresas olham para os processos automatizados como a possibilidade de crescerem, estabelecerem-se no mercado e serem competitivas com base nos objetivos de redução de custos, aumento da qualidade, capacidade de diversificar os seus produtos e reduzir tempos de fabrico e não conformidades [60]. A flexibilidade dos processos automatizados permite implementar a filosofia Lean, conseguindo-se alterar facilmente o processo, de forma a eliminar desperdícios e atividades sem valor acrescentado [61]. Estes dois termos associados introduzem a discussão da quarta revolução industrial e a era da digitalização [62].

2.6.1. Hierarquia dos Processos Automatizados

A estrutura da automação pode ser compreendida em cinco níveis (ver figura 2.16).

No nível 1, está a instrumentação instalada nos equipamentos e que é responsável pela recolha de informação de campo. Sensores de posição, vigias de rotação, leitura de dados, medição de temperatura e toda a instrumentação desposável por fazer a proteção da integridade do equipamento estão neste nível. No nível 2, está o PLC que realiza o controlo lógico e, neste, inclui-se o processador, módulos I/Os, e *softwares* de comando que fazem a interface entre operador e o processo. No nível 3, têm-se os processos de análise e *report* que são alimentados com a informação recolhida pelo PLC, realizam a sua análise e emitem relatórios com a informação. No nível 4, estão os sistemas que apoiam a tomada de decisões. São alimentados com a análise dos dados feita pelos processos do nível 3, analisam esses dados e tomam uma decisão consoante os objetivos que se pretendem alcançar. No topo, nível 5, estão os sistemas de gestão e planeamento dos recursos da empresa, como sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*). Estes englobam todos os sistemas descritos abaixo para colocar todas as áreas da empresa em comunicação, analisar os dados e tomar a melhor decisão possível [63].

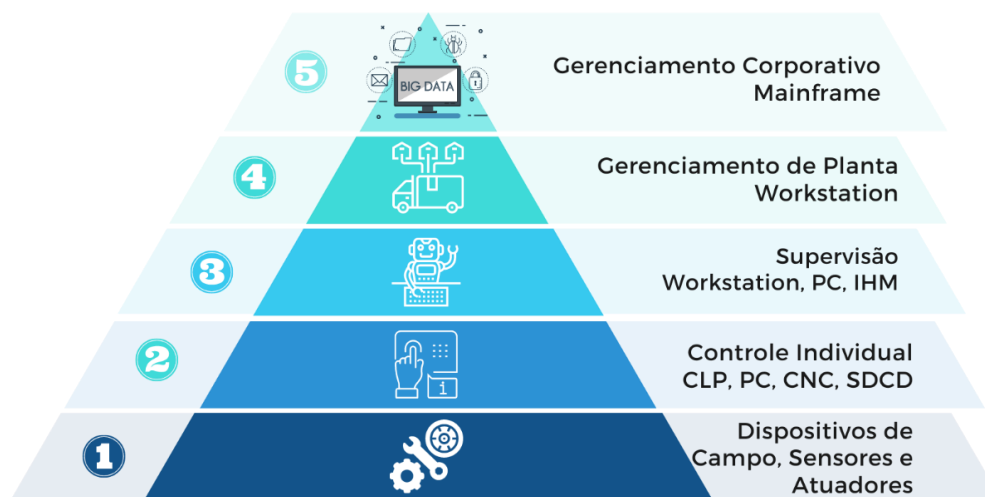


Figura 2.16 – Estrutura hierárquica das áreas constituintes dos processos automatizados [63].

2.6.2. Automação na indústria do cimento

A indústria cimenteira é um laboratório para qualquer área de investigação e a automação não é exceção. Ao longo do tempo, vários estudos foram realizados de forma a se automatizarem várias áreas do processo. A.K Swain testou a implementação de uma rotina de controlo construída em C++ que garantisse a qualidade da produção de cimento através do controlo da composição do cru [64]. I. G. Umbers *et al.* dedicou-se à análise das decisões dos operadores de comando de forma a construir um modelo do comportamento do operador [65].

Para a condução do forno, a automação é fundamental, visto as cimenteiras serem fábricas de grande extensão; fica possibilitada a adaptação do processo em tempo real, poupanças energéticas, apoia a recolha de dados e deteção de problemas [65]. Pretende-se usar processos automatizados, desde a extração do material da pedra até à ensacagem do cimento com sequências de arranque automatizadas e faseadas por tempo, e instrumentação binária e analógica a apoiar o controlo do

processo, como sensores de nível, vigias de rotação ou posicionamento de válvulas a garantir o funcionamento e integridade dos equipamentos do processo [66].

Os equipamentos com arranque sequenciado e faseado estão agrupados na automação de forma que o operador seja capaz de seleccionar determinado grupo e iniciá-lo. Ao se seleccionar o grupo, serão verificados todos os sinais que definem as condições para o arranque do grupo; pretende-se que o arranque seja feito sequencialmente, dos equipamentos no fim do grupo para os equipamentos no início do grupo, de forma que não seja depositado material descarregado sobre equipamentos desativados [67].

2.7. Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) é um sistema de comando de processos automatizados. Tem como função recolher informação dos equipamentos e instrumentação na instalação, processar a informação recolhida e desencadear respostas. A informação é recebida através de sinais de *inputs* e as repostas emitidas através de sinais de *outputs*. O PLC permite a operação automática de um processo e aumenta a sua adaptabilidade, reduzindo custos e necessidade de mão de obra [28]. Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e DCS (*Distributed Control Systems*) são sempre referidos em sistemas de controlo automatizados de processos, o primeiro mais focado na recolha da informação do campo e o segundo desenvolvido para o controlo de uma grande instalação [28].

Os PLCs são constituídos por *hardware* e *software*. O *hardware* é constituído pelo chassis de suporte dos componentes e que serve para designar a posição de cada um. Neste, está instalada a fonte de alimentação, a Unidade Central de Processamento (CPU) e os módulos de que recebem e emitem *inputs* e *outputs* (I/Os) [68].

A nível de *software*, o CPU é responsável por correr o programa e realizar a recolha do estado dos *Inputs* a cada ciclo, assim como fazer a emissão dos sinais de *Outputs* [68].

Na figura 2.17, pode ver-se um esquema com os vários constituintes de um PLC e como estes se interligam.

Mediante o número de pontos de *Inputs/Outputs*, os PLCs podem ser classificados como *Micro PLCs*, *Small PLCs*, *Medium PLC*, *Large PLCs* e *Very Large PLCs*, mediante a quantidade de pontos I/O, memória, capacidade de comunicação com outro PLC e implementação de controladores PID [69].

As linguagens de programação padrão são definidas pela norma IEC 61131-3 e é publicada pela comissão internacional eletrotécnica [69]. As cinco linguagens que esta engloba são *Ladder Diagram*, *Sequential Function Charts*, *Function Block Diagram*, *Structured Text* e *Instruction List* [69].

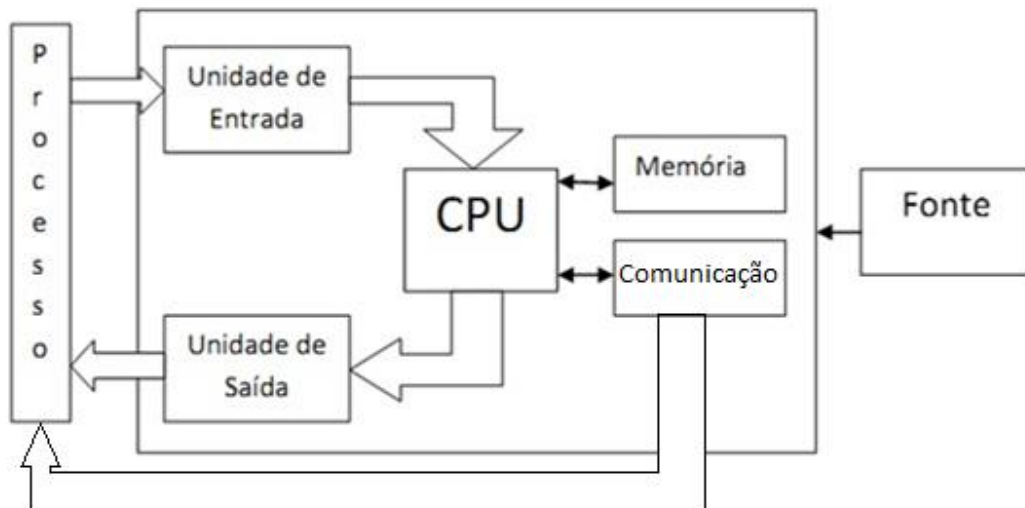


Figura 2.17 – Esquematização do funcionamento de um PLC com relação das várias áreas que o constituem. Adaptado de [69].

2.7.1. Sequential Function Charts (SFC)

Comummente designado por Grafcet (*Grphe Fonctionnel de Commande, Étapes Transitions*), a *Sequential Function Charts* (SFC) é uma linguagem de programação de PLCs gráfica com a possibilidade de ser facilmente editada que foi introduzida na década de 70 [70]. Este tipo de programação é usado em todo o tipo de processos automatizados. Na figura 2.18, está a construção lógica programada em SFC. É possível ver a representação das variáveis e os estados dos equipamentos em cada fase. É possível ver que as variáveis C0, C1 e C2 se têm de verificar para alcançar os estados Q1, Q2 e Q3, respetivamente [70].

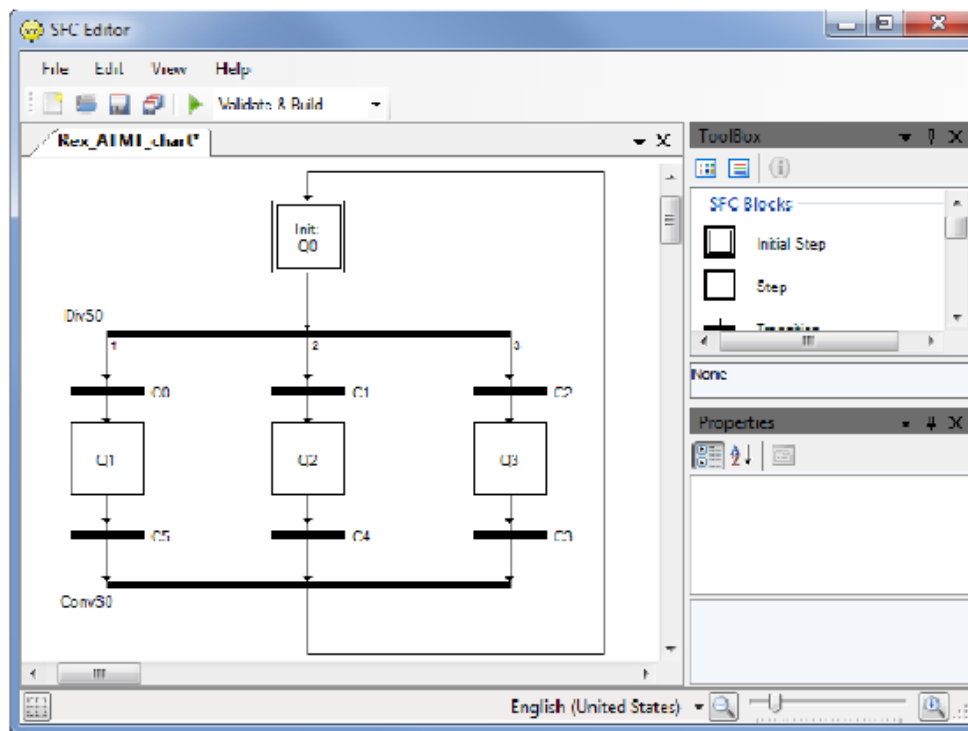


Figura 2.18 – Construção de um código em *Sequential Function Chart* com representação dos vários passos e das variáveis [70].

O programa é construído a partir de variáveis que se têm de verificar, para que o equipamento tenha condições para avançar para o próximo estágio, gerando um *output*. Ao se finalizar o programa, este irá fazer *reset*. Denomina-se por transição a passagem de um estado para outro. Para processos complexos e com várias hipóteses de *output*, podem existir vários tipos de transições, o que tornará o programa complexo e difícil a tarefa de rastreio de erros. Na figura 2.19, pode ver-se que as transições podem ser simples (1), alternativa (2), divergente (3), convergente (4) e divergir e convergir em simultâneo (5) [71]. Na figura 2.20, está a construção de um programa simples em SFC com a descrição de *inputs* e *outputs* que desencadeiam as ações do equipamento. A lógica de programação pode tornar-se tão complexa quanto se pretenda, bastando usar as transições mostradas na figura 2.19 para se verificar uma quantidade superior de variáveis, como se pode ver na figura 2.21.

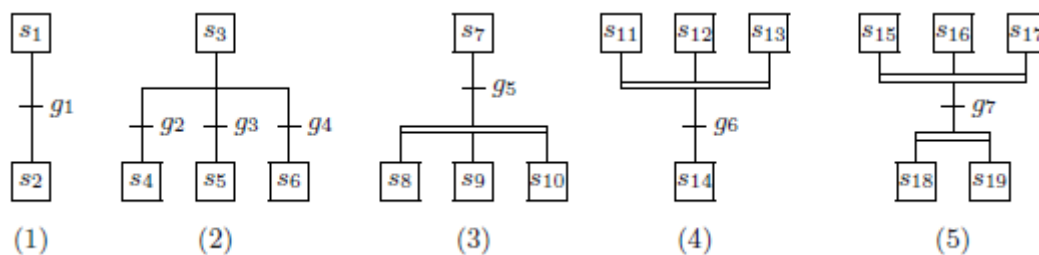


Figura 2.19 – Transições da linguagem de programação SFC. Está representado uma transição simples (1), alternativa (2), divergente (3), convergente (4) e divergir e convergir em simultâneo (5) [71].

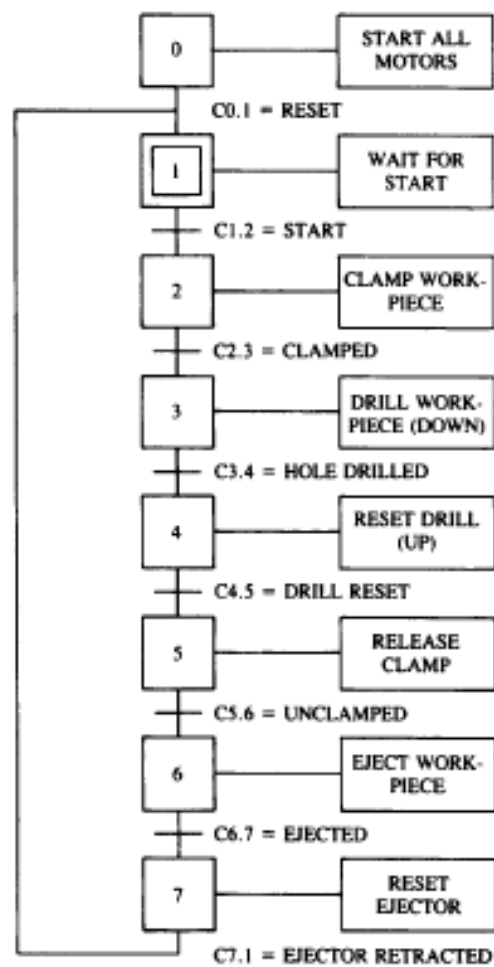


Figura 2.20 – Lógica construída em SFC com a descrição dos *inputs* e dos *outputs* gerados [71].

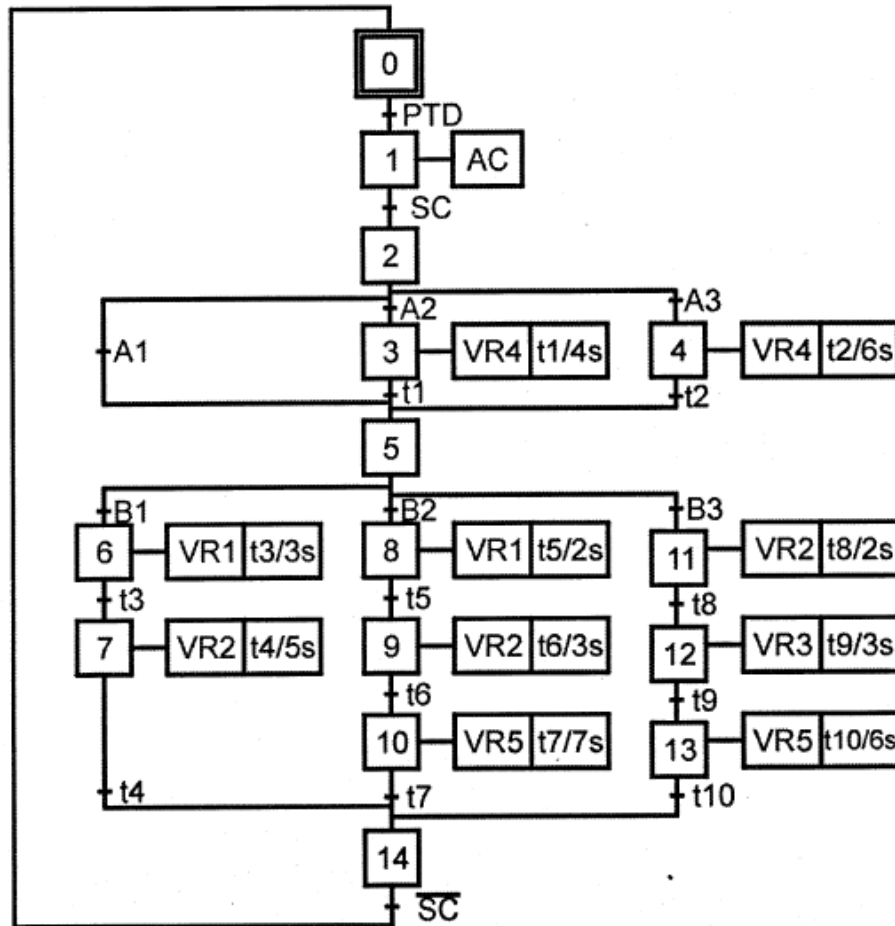


Figura 2.21 – SFC construído com várias transições. Retirado da net para mostrar que um Grafecet se pode tornar complexo.

2.7.2. Function Blocks Diagram

Function Blocks Diagram (FBD) é uma linguagem de programação gráfica que utiliza os blocos de controlo para definir as condições, receber *inputs* e emitir *outputs* [72]. Apesar das diferenças gráficas com SFC, o método de raciocínio lógico é semelhante [73]. A definição das condições de relação dos *inputs*, nesta linguagem, é gerada através do bloco de controlo selecionado, assinalado no topo do bloco. Exemplos destes são “&” e “>=1” designam os comandos “e” e “ou”, respetivamente. Pode fazer-se ainda *reset* aos *outputs*, mediante condições ou até comparar *inputs* [74]. Na figura 2.22, pode ver-se os blocos de transição usados em FBD usados para receber *inputs* e desencadear *outputs*.



Figura 2.22 - Blocos de transição de FBD com diferentes funções assinaladas [74].

2.7.3. Structured Text

Structured Text (ST) é uma linguagem de programação de PLC não gráfica semelhante a Python ou C, existindo compiladores com capacidade de fazer a conversão entre as duas linguagens de programação [75]. Os comandos usados são idênticos, utilizando-se *if*, *else*, *while*, *then* e outros. É necessário definir *inputs*, *outputs* e os seus estados. Assim sendo, mantém-se a possibilidade de reescrever um código de forma versátil [76]. De entre as linguagens de programação de PLC referidas, devido à sua complexidade, ST é das linguagens mais complexas. Contrariamente às linguagens gráficas, ST não é fácil de aprender, de desenvolver código ou de interpretar [77].

Na figura 2.23, é possível ver um código desenvolvido em ST. Podem ver-se as semelhanças com C nos comandos e na estrutura da programação.

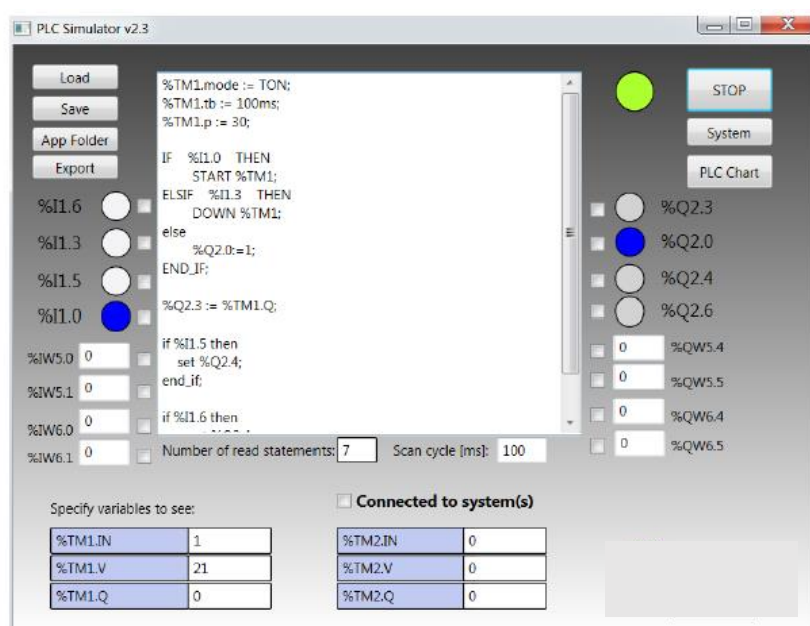


Figura 2.23 – Código de programação desenvolvido em *Structured Text* para o controlo de equipamentos através de PLCs [77].

2.7.4. Instruction List

Instruction List (IL) é uma linguagem de programação por texto, tem baixo nível de complexidade e os comandos são programados e executados por ordem de linhas, designadas por *Labels*. Semelhante a ST, é necessário realizar a definição de variáveis e informar o sistema se esta é *input* ou *output*, como se pode ver na figura 2.24. Em IL, têm-se os *operator*, definidos como a função a executar em cada *label*, e os *operand*, variável afetada pelo *operator* em cada *label*, como se pode ver na figura 2.25. Na figura 2.26, podem ver-se vários tipos de *operators* com diferentes funções usados em IL [78].

$$P ::= \left\{ \begin{array}{ll} var_{in}; & \text{list input variables} \\ var_{out}; & \text{list output variables} \\ var_{loc}; & \text{list local variables} \\ body; \end{array} \right\} \quad \text{list of instructions}$$

Figura 2.24 - Definição de variáveis em *Instruction List* [78].

LABEL	OPERATOR	OPERAND
11:	LD	x
	ADD	3
	JMP	11

Figura 2.25 - *Label* construída em *Instruction List*. A primeira coluna corresponde à *Label*, a Segunda ao *Operator* e a Terceira ao *Operand* de cada *Operator* [78].

i	$::=$	LD <i>op</i>	load
		ST <i>id</i>	store
		SR <i>id</i> RS <i>id</i>	set and reset
		JMP <i>lbl</i> JMPC <i>lbl</i>	jumps
		JMPCN <i>lbl</i>	
		ADD <i>op</i> SUB <i>op</i>	integers
		MUL <i>op</i>	
		AND <i>op</i> OR <i>op</i>	booleans
		ANDN <i>op</i> ORN <i>op</i>	
		NOT <i>op</i>	
		EQ <i>op</i> GE <i>op</i>	comparison
		GT <i>op</i>	
		TON <i>id</i> , <i>n</i>	On delay timer
		RET	end of program

Figura 2.26 - Lista com *operators* usados em *Instruction List* para diferentes funções [78].

2.8. Relay Ladder Logics

Ladder Logics é uma linguagem de programação dedicada à automação de processos industriais que recebe os *inputs* que chegam ao PLC e emite *outputs*, de acordo com o pretendido pelo programador [79]. Esta linguagem tem por base a *Relay and Contactor Logic*, onde condições de *set-up* e arranque de um equipamento eram verificadas através do estado de relés. Este método de automação ficou obsoleto com a digitalização. Era eficaz, mas a adaptação de processos e o rastreio e resolução de problemas era bastante mais complexa e demorada quando comparada com o trabalho em *Ladder* usando um *software* [80].

A *Ladder Logics* é constituída por dois elementos principais, sendo estes o *input* “Normally Opened” (NO) e o “Normally Closed” (NC), que podem ser vistos na figura 2.27. Existem também blocos de comando onde são inseridas condições como temporizadores ou vigilâncias de rotação [80].

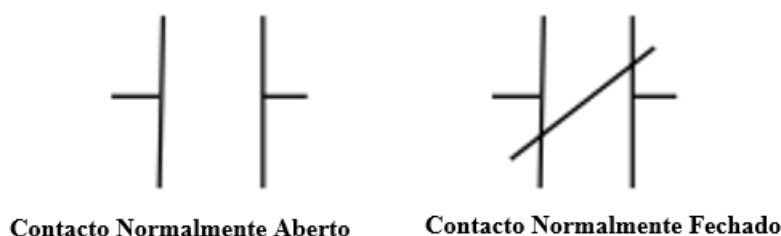


Figura 2.27 - Comandos Contacto Normalmente Aberto e Contacto Normalmente Fechado usados em *Ladder Logic*.

A lógica para a validação de *outputs* é construída em rotinas e é simples de ler; um NO verifica-se quando o PLC recebe o sinal elétrico de campo, enquanto um NC é verificado quando o PLC não recebe determinado sinal. Esta verificação dos sinais é realizada periodicamente através de ciclos de execução.

Para o *output* de uma dada rotina se verificar, todas as condições têm de ser verdade [79]. A lógica dentro das rotinas é construída em *rungs*, podendo uma rotina contemplar mais do que um *output* [81]. Todos os *inputs* inseridos na mesma *rung* têm de ser verificados em simultâneo. Os *inputs* inseridos em posição paralela são lidos como “ou”, sendo alternativas a estes [82].

Na figura 2.28 (a), o *output* “C” é atribuído, caso o PLC receba o sinal de “a” e não receba o sinal de “b”. Na figura 2.29 (b), o *output* “e” é emitido caso se receba sinal de “a” e “d”, ou se receba sinal de “b” e “d”, ou não se receba sinal de “c” e se receba sinal de “d” [82].

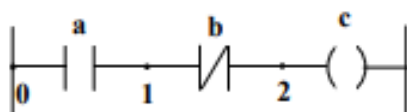


Figura 2.28 – *Rung* com representação da equação $a.b̄=c$ em *Ladder*.

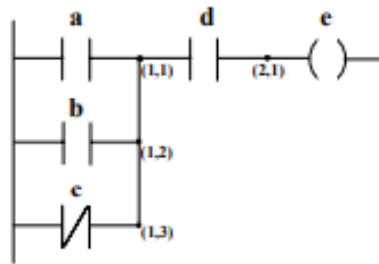


Figura 2.29 – Rung com a representação da equação $(a+b+c^-).d=e$ em Ladder.

2.8.1. Relay Ladder Logics no Cimento

O Ladder é utilizado nos PLCs da indústria cimenteira para controlar o processo produtivo e no transporte de materiais. Na condução do processo produtivo, as condições aplicadas são construídas de modo a garantir a qualidade do produto e a proteger os equipamentos. Na produção de cimentos, as operações são relativamente simples, tratando-se de acionamento de motores e ajuste da posição de válvulas.

O método de acionamento dos equipamentos tem por base a distribuição destes por grupos e a sua ativação sequenciada, iniciando-se pelos equipamentos do fim da linha para os do início desta, impedindo que ocorra descarga de material em equipamentos parados e sendo estas condições atribuídas na programação do Ladder. As condições de início de cada equipamento são atribuídas na rotina criada especialmente para este [66].

Para se facilitar a seleção dos equipamentos, é costume agrupar-se aqueles que têm um objetivo em comum, por exemplo “linha de transporte de marga ao silo”, numa rotina que os agrupa. O operador que queira ativar este sistema de transporte terá apenas de selecionar o grupo pretendido, fazendo com que todos os equipamentos se ajustem às suas funções e o PLC faça a verificação das condições de arranque garantidas pelos alarmes. No entanto, uma rotina apenas é capaz de realizar o acionamento de vários equipamentos [67].

A instrumentação dos equipamentos entra para garantir a qualidade do processo e a integridade do equipamento, podendo-se contar com alarmes de nível (alto, baixo ou ambos), vigias de rotação, medição de velocidade, alarmes de temperatura e outros [65]. Na rotina de cada equipamento, o estado de alarmes, como níveis e sensores de posição, é verificado de forma a reunir condições para o arranque à máquina [65]. No caso de haver um alarme de nível cuja condição não se verifique, o equipamento ao qual este corresponde não irá iniciar a função e, consequentemente, os equipamentos seguintes contidos no grupo deste também não o farão [65].

2.9. Monitorização do PCI – Estado da Arte

A medição do Poder Calorífico Inferior (PCI) de combustíveis permite concluir acerca da qualidade dos mesmos. Este tema tem sido amplamente estudado com o objetivo de se obterem processos mais eficientes e automatizados [83]. Os Sistemas de Espetroscopia Visível, Sistemas de Espetroscopia

Raio-X, Sistemas de Espectroscopia NIR e os Sistemas de Imagiologia Hiper Espetral NIR são exemplos de tecnologias usadas para realizar a medição destes parâmetros.

Os Sistemas de Espectroscopia Visível realizam a identificação do tipo de material em circulação usando a captação de imagem. A classificação do material é feita com base na geometria 2D e cor. Tem como limitação a impossibilidade de analisar quimicamente o material. Os Sistemas de Espectroscopia Raio-X são aplicados na medição de PCI têm como principal ponto forte a detecção de cloro (Cl) e enxofre (S), elementos indesejados na combustão devido a causarem a corrosão de partes metálicas, sendo que no processo de produção de clínquer constituem grandes danos para o queimador do forno [84] [85].

Os sistemas de Espectroscopia na gama *Near-Infrared* (NIR) tem capacidade de realizar a função de análise de poder calorífico. Este tipo de espectroscopia possibilita a detecção de materiais orgânicos, como têxteis, papel e cartão e materiais poliméricos, como HDPE, PET e o indesejado PVC [86]. Esta gama consegue também fazer a leitura do pico característico da água no espectro[86]. No entanto, tem como desvantagem a capacidade de analisar apenas a superfície do combustível. A incorporação de recolha de imagem neste sistema possibilita a medição da área de partículas 2D. A baixa resolução da captação de imagem é um ponto fraco, quando se opera com partículas de dimensão reduzida.

2.9.1. Indústria 4.0

A implementação de um sensor para ler o PCI dos CDRs, na fábrica da Secil, vai de encontro aos objetivos da Indústria 4.0. Este termo define o crescimento exponencial da utilização da digitalização aliada à automação e inteligência artificial na indústria para se conseguir sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis, sendo classificada como a quarta revolução industrial [87]. A revolução industrial deu-se com a extensão da utilização de equipamentos mecânicos e vapor, seguida pelo crescimento na utilização da energia elétrica (segunda revolução industrial e posteriormente pela forte propagação de sistemas digitais) [88].

Com esta evolução, existem termos usados como objetivos a alcançar para a indústria 4.0, sendo que, para a indústria moderna, este passo é um objetivo principal. *Smart Factory*, *Flexibility* e *Resource Efficiency* realçam as metas da indústria 4.0; uma fábrica capaz de tomar decisões certas autonomamente, se adaptar a novos projetos facilmente e desenhada para aproveitar os recursos disponíveis com a maior eficácia possível, reduzindo desperdícios de material, energéticos e de tempo e dando uma identidade a cada produto, sendo possível a um operador controlar toda a fábrica a partir de uma estação de trabalho [89].

Internet of Things, Inteligência Artificial, Fabrico Aditivado e Robótica são tecnologias que se pretendem colocar em prática na indústria para responder aos termos anteriores [90].

O termo *Internet of Things* é usado para definir uma rede que realiza a comunicação entre várias tecnologias em operação numa fábrica e se consegue adaptar aos desafios de forma rápida, tendo como base protocolos [91]. Esta designação surgiu para nomear a utilização da tecnologia RFID para unir o físico e o digital [92]. O grande desafio neste sentido é aumentar a sinergia entre máquinas de forma que estas comuniquem entre si autonomamente, sendo para isso fulcral o desenvolvimento

de instrumentação, aperfeiçoamento de conexões, e a possibilidade de estas tomarem decisões inteligentes sem a interferência do Homem [93].

2.9.2. Internet of Things

Atualmente, a IoT tem milhares de propostas de aplicações, tendo identificado várias tecnologias para apoiarem a realização de diversas operações, como garantir a medição do nível de desgaste de um equipamento mecânico a fim de se conseguir intervir neste antes de haver falhas e quebras de produção, ou a gestão automática de sistemas luminosos para dar indicações relacionadas com segurança [94]. A leitura de poder calorífico é uma aplicação a ser adicionada a esta lista, visto que os valores podem ser enviados pela rede, a informação, processada e consegue-se desencadear uma resposta do PLC. Outra implementação serão os modelos preditivos de PCI para determinar a taxa de recuperação de calor de RSU que, ao serem integrados no processo de fabrico, conseguiriam transmitir-lhes que porção de material se deve ou não usar de forma a maximizar a qualidade do produto e reduzir custos [83].

Capítulo 3

Como descrito anteriormente, um dos objetivos do projeto é atingir a *Carbon Neutrality*. Um passo para isso será a concretização do objetivo de operação da linha IX utilizando uma proporção de combustível da qual 85% do calor provenha de combustíveis alternativos aos fósseis.

Para se alcançar o objetivo, foi necessário modernizar a tecnologia da linha para a produção de clínquer. A instalação de um calcinador com câmara de combustão incorporada veio permitir a concretização do objetivo, otimizando o processo existente. No entanto, foi necessário o ajuste do *layout* e logística da fábrica. Neste capítulo, serão mostradas algumas alterações feitas na instalação da fábrica da Secil para se alcançar o objetivo *zero fossil fuels* e o cumprimento da política climática europeia. Sendo um projeto inovador na Europa, o resultado e melhoramentos a que se procedeu são relevantes na medida em que se tem uma montra de exposição para uma intervenção que terá de ser realizada em toda a indústria cimenteira.

3.1. Produção de clínquer

O clínquer é o principal constituinte do cimento *Portland*. É obtido através de vários estágios num processo produtivo. Pode destacar-se a preparação do cru, o estágio de calcinação e o estágio de clinquerização. O primeiro estágio é obtido através de moagem das matérias-primas rochosas e respetiva mistura, obtendo-se o designado cru. As restantes são obtidas através do fornecimento de calor ao material.

3.1.1. Preparação do cru

A fase inicial da produção de cimento é a preparação do cru, processo que consiste em moer as rochas que se extraem da pedra, a marga e o calcário. A matéria moída é transportada e armazenada para o interior de silos. É, depois, introduzida no forno, sendo adicionados outros compostos e designando-se, agora, como cru. Esta mistura é composta por marga, calcário, pirite, areia e outros componentes. A proporção na mistura é fundamental para as reações necessárias adiante no processo, sendo nestas que se inserem o carbonato de cálcio (CaCO_3), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3).

A moagem é realizada com recurso a moinhos, podendo estes ser horizontais ou verticais. Na Secil Outão, existem os dois tipos, sendo que apenas os verticais são utilizados para moer a matéria-prima.

Nas moagens horizontais, a matéria-prima é introduzida no interior do moinho. No seu interior, existem esferas metálicas. Ao se dar o movimento de rotação da virola do moinho, as esferas irão embater no material de granulometria elevada, reduzindo-a. Nos moinhos verticais, as esferas são

substituídas por mós. A matéria-prima de granulometria elevada é assente no tampo de uma mesa rotativa. O material rochoso é levado para debaixo das mós, obtendo-se a granulometria mais fina.

3.1.2. Calcinação

A calcinação é fundamental à produção de cimento, é um estágio da produção de clínquer e ocorre na parte inicial do forno.

O cru é introduzido no processo, sendo aquecido no interior de ciclones separadores de partículas e, fundamentalmente, no interior do forno rotativo através de um dos seus extremos. O estágio de calcinação irá ocorrer com recurso ao calor fornecido no interior a temperaturas entre os 700 e 900 °C, ocorrendo a libertação de cal virgem (CaO) e dióxido de carbono (CO_2) contidos no calcário (CaCO_3).

A cal virgem irá depois reagir com a sílica e originar silicato bicálcico (C_2S) a temperaturas entre os 800 e 1200 °C.

Na figura 3.1, é possível ver os componentes de um forno rotativo de produção de clínquer e as zonas do mesmo onde ocorre a etapa de calcinação e a etapa de sinterização.

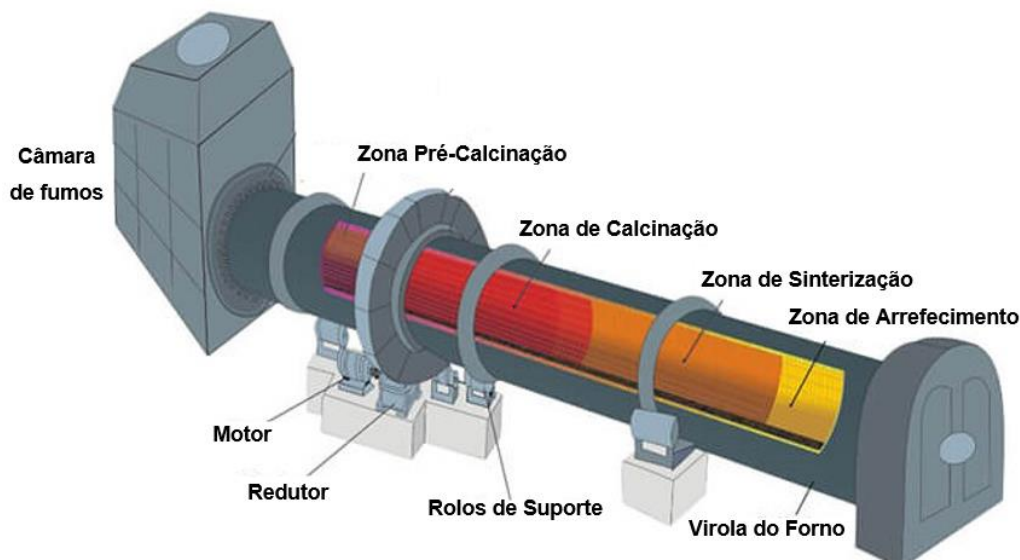


Figura 3.1 - Estrutura de um forno de produção de clínquer com a identificação das zonas de transformação da matéria.

3.1.3. Clinquerização

O processo de clinquerização é obtido a uma temperatura superior ao de calcinação, estando entre os 1200 e 1450 °C. O silicato bicálcico obtido anteriormente irá reagir com óxido de cálcio e originar silicato tricálcico (C_3S). Acima dos 1300 °C, surge a fase líquida através da combinação entre a cal virgem (CAO), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). A fase líquida será arrefecida nos satélites do forno, formando-se o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF). Obtêm-se, assim, os quatro principais constituintes do clínquer (tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Constituintes do clínquer e proporção.

Designação Componente Clínquer	Fórmula Química	Composição (%)
Silicato Bicálcico	C ₂ S	[10;55]
Silicato Tricálcico	C ₃ S	[20;65]
Aluminato Tricálcico	C ₃ A	[0;15]
Ferro Aluminato Tetracálcio	C ₄ AF	[5;15]

3.2. Instalação Secil Outão

As linhas da Secil são de via seca, não necessitando da introdução de água no processo de homogeneização do cru. Está equipada com dois moinhos verticais para a moagem de matéria-prima e outros dois destinados à moagem de *Petcoke*. Tem ainda duas linhas de produção de clínquer independentes, designadas Linha VIII e Linha IX (a mais recente), ambas constituídas por ciclones, forno rotativo e arrefecedores de satélites. Para a produção de cimento, estão instalados três moinhos horizontais, sendo um deles junto às linhas de produção e dois no cais da fábrica.

3.2.1. Linha IX Pré-Revamping

A fase de calcinação é totalmente realizada no interior do forno em ambas as linhas da Secil. Focando na linha IX, intervencionada pelo Projeto CCL, esta é constituída por dez ciclones, divididos em quatro estágios, sendo que o primeiro é constituído por quatro ciclones. Após descer através dos vários estágios de ciclones, onde vai sendo aquecido pelo contacto com o ar quente vindo do interior do forno, o cru é entregue através da câmara de fumos ao forno, onde se dão as reações de calcinação e de clínquerização. Agora designado como clínquer, irá entrar nos satélites de arrefecimento situados no exterior da parte final do forno, onde irá trocar calor com água e arrefecer. Através da rotação do forno, o clínquer em estado sólido sai do interior dos satélites e é passado no interior de dois britadores com o objetivo de se reduzir a sua granulometria, antes de ser transportado para o interior do silo de armazenamento. A linha 9 da Secil tinha uma capacidade de produção de 3200 toneladas, por dia, de clínquer anteriormente à realização do Projeto CCL.

O calor necessário ao processo é fornecido através do queimador do forno. Este emite uma chama que atinge temperaturas até 2000 °C.

O sentido dos gases é inverso ao da matéria. Os gases são deslocados devido à depressão causada por ventiladores e forçados a percorrer todo o percurso inverso ao do cru, sendo que o ar entra no forno através do queimador e irá sair do processo após passar na torre de arrefecimento.

Na figura 3.2, pode ver-se onde se inserem os ciclones, satélites e queimador no processo. É possível também ver a indicação da zona de calcinação e sinterização.

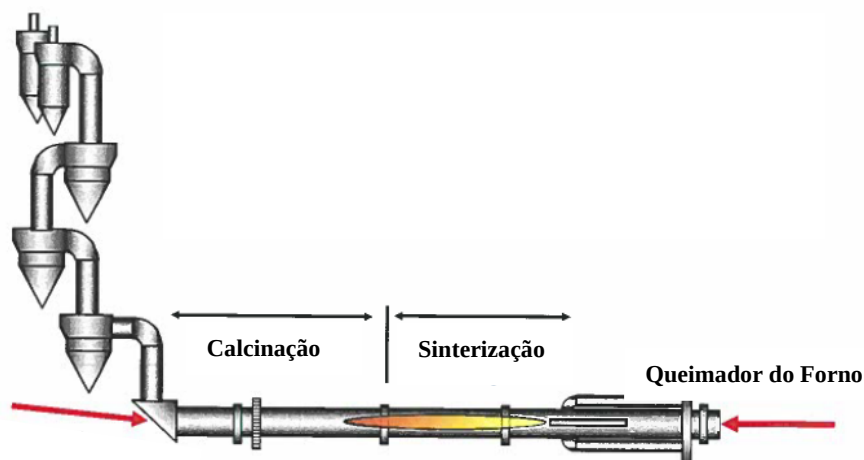


Figura 3.2 - Esquematização de uma linha de cimento constituída por ciclones e forno com satélites para arrefecimento do clínquer. Semelhante à Linha IX da Secil posteriormente ao Projeto CCL – *Clean Cement Line*.

3.3. Instalação Secil Outão – *Revamping* CCL

O principal projeto assenta no *revamping* da Linha IX da Secil. Ao longo desta, foram realizadas várias modificações com o objetivo de se aumentar a eficiência energética, reduzir a utilização de combustíveis fósseis e aumentar a produção de clínquer para 4000 toneladas, por dia.

O *revamping* da linha foi realizado em parceria com a empresa *Thyssenkrupp Industrial Solutions* AG, sendo esta responsável pelo projeto de engenharia de detalhe, pelo fornecimento dos equipamentos e sua instalação. A *Thyssenkrupp* tem historial em várias áreas de negócio, sendo uma delas a área dos cimentos.

As grandes inovações, na linha, são a instalações de um calcinador e arrefecedor de grelhas de última geração. A sinergia destes equipamentos é aumentada com a instalação da conduta do ar terciário, responsável por conduzir parte do ar quente do interior do arrefecedor de grelhas para o calcinador. Com a adição do pré-calcinador, vem a adição do Prepol, uma câmara de combustão que irá constituir um segundo ponto de calor no processo produtivo.

Na figura 3.3, é possível ver uma linha de produção de cimento esquematizada pela *Thyssenkrupp* e com a indicação da posição do calcinador e arrefecedor de clínquer no processo. Este esquema inicia-se no britador da matéria-prima e termina na moagem de cimento e mostra vários tipos de equipamentos projetados pela *Thyssenkrupp* no âmbito da indústria do cimento [95].

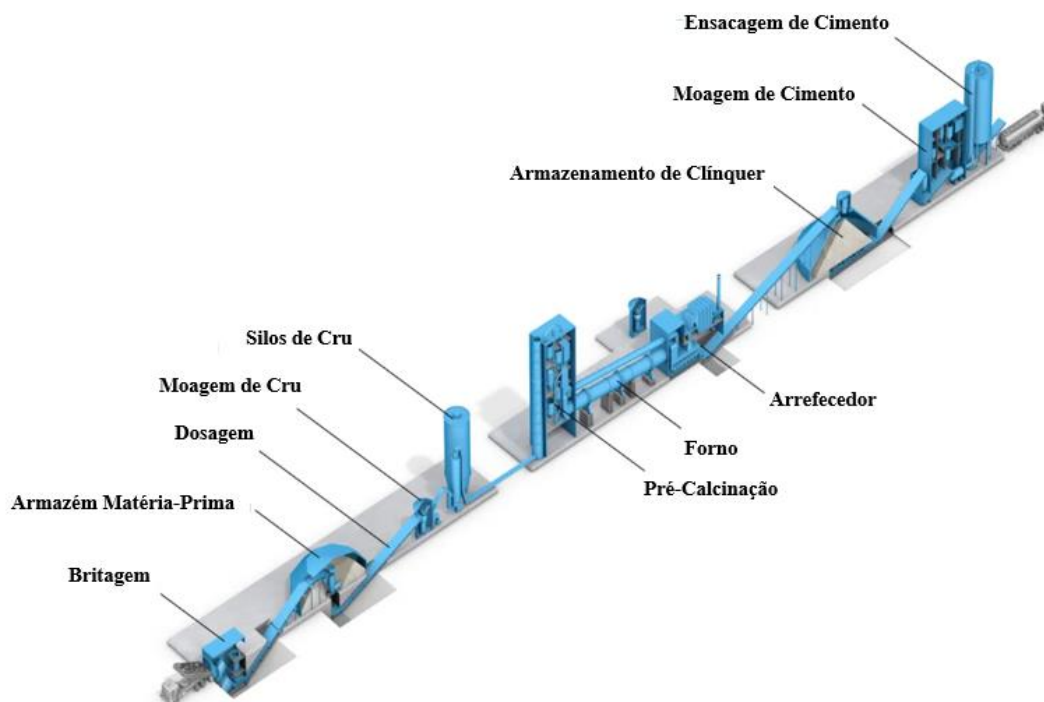


Figura 3.3 - Linha de produção de cimento esquematizada pela *Thyssenkrupp* com a inclusão do calcinador e do arrefecedor de grelhas no processo de produção de clínquer no processo [95].

3.3.1. Instalação do Calcinador

Como descrito anteriormente, o aquecimento do cru é iniciado no interior dos ciclones quando este entra em contacto com os gases quentes que vêm do interior do forno. Este entra no interior do forno e, após atingir a temperatura entre os 700 e os 900 °C, ocorre a calcinação. A instalação de um calcinador no processo altera esta sequência.

O calcinador funciona como uma etapa adicional de ciclones. É constituído por uma conduta metálica, isolada por betão refratário. Após a passagem no estágio de ciclones, o cru irá passar no interior desta conduta e será depois enviado para o interior do forno. A temperatura dos gases nesta fase está entre os 700 e os 900 °C. Assim, o estágio de calcinação será adiantado e ocorre no interior deste equipamento. Ao sair do calcinador, 90% do cru já terá passado pela fase de calcinação, sendo que o restante material o fará no interior do forno. Para se atingir tal temperatura, nesta fase do processo, foi adicionado um ponto de calor ao calcinador na forma de uma câmara de combustão, designado pela *Thyssenkrupp* como Prepol.

Para a instalação do equipamento, modernizaram-se também os ciclones, sendo que se mantiveram os quatro estágios. O primeiro estágio passou de quatro ciclones para dois. O trajeto da matéria-prima foi alterado, iniciando-se no primeiro estágio e passando para o terceiro. Posteriormente, percorre a conduta central do calcinador em sentido ascendente até ser entregue aos ciclones de quarto estágio e depois é entregue ao forno. Os ciclones de segundo estágio são utilizados para escapes de

material; o cru não separado do terceiro estágio será entregue ao segundo estágio, depois ao quarto e, por fim, entrará no forno. Sofrerá a calcinação no interior do forno.

O calcinador instalado na Secil, no âmbito do Projeto CCL, pode ser visto na figura 3.4. Para se realizar esta instalação, foi necessário reforçar-se a torre de calcinação e a criação de uma laje de betão que o suporta. Este é constituído por vários módulos, suportados pela estrutura metálica que se vê na figura.



Figura 3.4 - Calcinador instalado na Secil no âmbito do Projeto CCL - *Clean Cement Line*.

3.3.2. Instalação do Prepol

O ponto de calor fornecido pela *Thyssenkrupp* para a torre de calcinação é designado por Prepol. O Prepol é um espaço físico inserido na conduta do pré-calcinador que funciona como uma câmara de combustão para sólidos com um espaço de combustão de 14 m³. Este equipamento foi dimensionado para receber CDRs com PCI mínimo de 19,2 MJ/Kg. A dimensão do material é importante para uma boa combustão, tendo os valores máximos da granulometria especificados de 50 mm x 50 mm x 10 mm. Tem uma performance térmica máxima de 71 MW.

O combustível é introduzido através de dois orifícios, forçado a entrar com recurso a dois

transportadores sem fim. A base do Prepol é constituída por três degraus. Ao entrar na câmara, o combustível irá empurrando o material que lá permanece através dos degraus. Na base de cada um dos degraus, existe uma abertura para entrada de ar. Esta abertura está ligada a canhões de ar com as funções de introduzir ar no processo, apoiar a circulação do combustível e evitar encravamentos.

A instalação do Prepol é relevante, visto ser este que contribui em grande medida para o objetivo da redução da taxa de utilização de combustíveis fósseis. Sendo uma câmara incineradora, possibilita a combustão de combustível sólido de pior qualidade; menor poder calorífico, granulometria heterogénea e maior teor de humidade; tem-se um ambiente favorável à utilização de CDRs, que se projeta a inserção de 17 toneladas deste combustível, por dia. Sendo projetado para a combustão de resíduos sólidos, a instalação do Prepol foi um passo importante na redução do carvão na fábrica da Secil [96].

Na figura 3.5, é possível ver os transportadores sem fim de alimentação de combustível ao Prepol, o sistema de refrigeração dos transportadores e o interior da câmara de combustão.



Figura 3.5 - Transportadores de alimentação de CDRs ao Prepol (a) e câmara de combustão do Prepol (b).

3.3.3. Instalação do Arrefecedor de Grelhas

Foi anteriormente referido o arrefecimento através de satélites instalados na parte final do forno. No âmbito do projeto, a tecnologia de satélites foi substituída por um arrefecedor de clínquer de grelhas. Ao sair do forno, o clínquer irá cair no interior do arrefecedor, onde será arrefecido através da permuta com o ar deslocado por sete ventiladores. As grelhas irão fazer o deslocamento do clínquer para fora do processo, sendo acionadas por macacos hidráulicos.

O arrefecedor de grelhas instalado (ver figura 3.6), de fornecimento *Thyssenkrupp*, é constituído por sete módulos responsáveis pelo transporte de clínquer. Com exceção do primeiro módulo (caída de clínquer no interior do arrefecedor), cada módulo está equipado com seis cursos de grelhas que são acionadas por macacos hidráulicos para que estas realizem o movimento linear de transporte de clínquer na direção da saída, enquanto este é arrefecido.

No final do arrefecedor de grelhas, está instalado um britador de três rolos para onde o clínquer é empurrado. O clínquer cairá entre os rolos em rotação, diminuindo a sua granulometria.

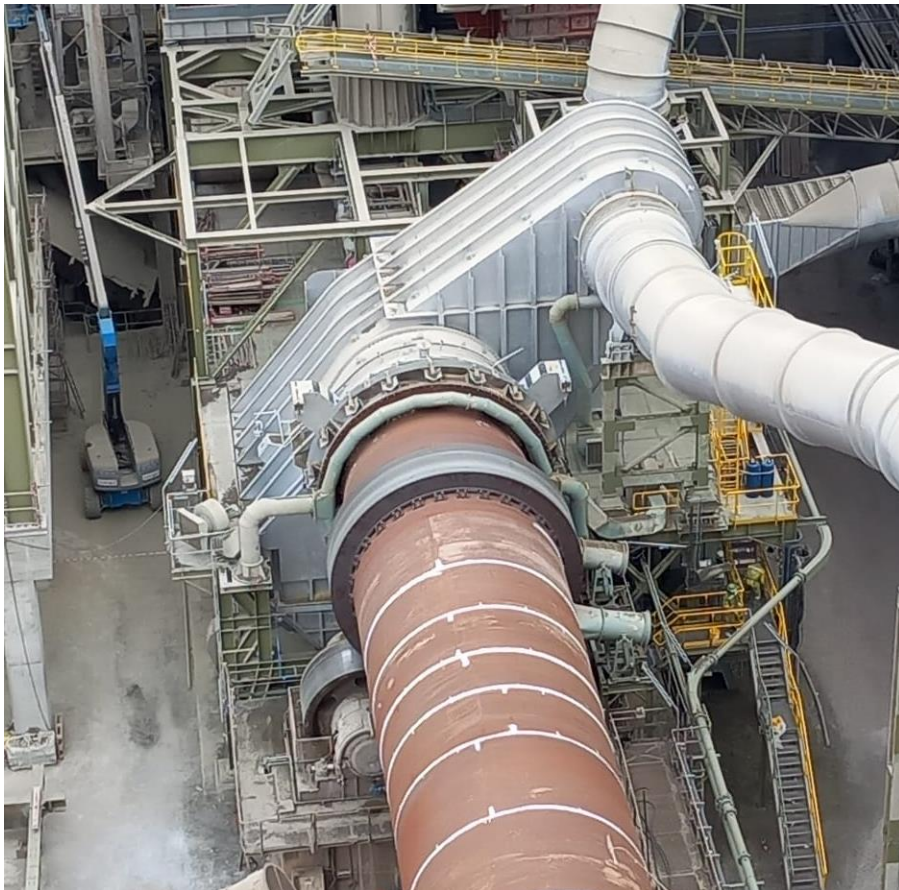


Figura 3.6 - Instalação do arrefecedor de grelhas na parte final do forno rotativo. Foi instalado no âmbito do Projeto CCL – *Clean Cement Line* - e suporta a conduta do ar terciário.

3.3.4. Conduta do Ar Terciário

A instalação da conduta do ar terciário é possível devido à instalação do arrefecedor de clínquer. Esta conduta tem início no arrefecedor e termina no calcinador. Como referido anteriormente, o clínquer será arrefecido através de permuta de calor com o ar. O ar quente será encaminhado para a conduta do calcinador, através da conduta do ar terciário, entrando junto ao Prepol, e ajudando a manter a temperatura, tendo como vantagem a redução da quantidade de combustível a injetar na câmara de combustão.

Na figura 3.7, é possível ver a temperatura do material, dos gases e a concentração de oxigénio nas várias fases do processo. É possível constatar que a temperatura dos gases e da matéria é máxima no interior do forno. Pode ver-se, também, que a concentração de oxigénio diminui. No entanto, no calcinador, existe um pico na concentração derivado da conduta do ar terciário.

Na figura 3.8, pode ver-se a conduta do ar terciário. Esta é suportada pelo arrefecedor de clínquer, instalado na extremidade do forno rotativo, e pelo calcinador.

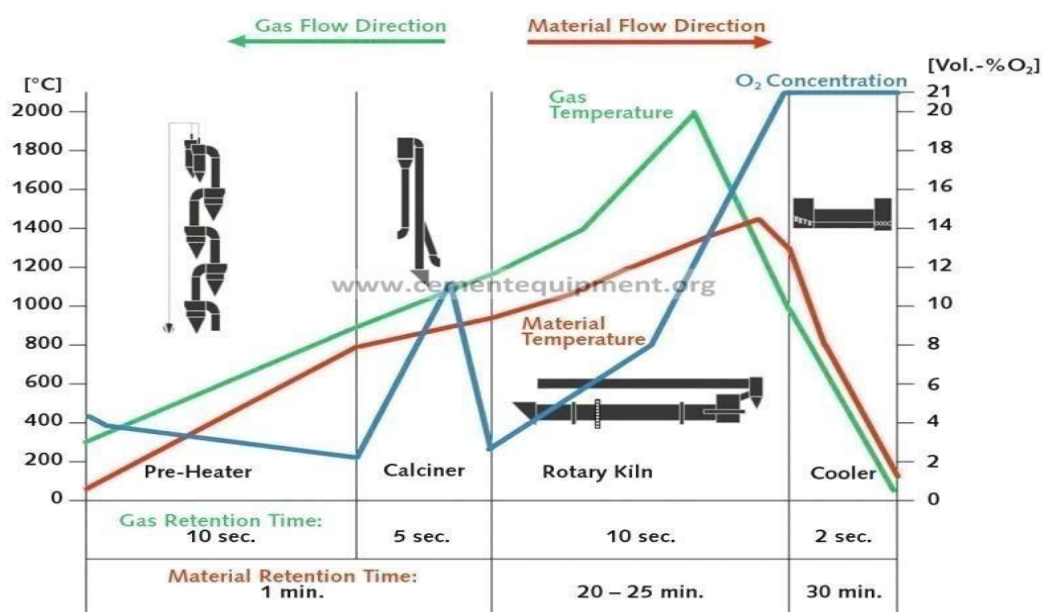


Figura 3.7 - Parâmetros de processo para uma linha com calcinador e arrefecedor de grelhas. É representada a temperatura do material, dos gases e a concentração de oxigênio para os vários pontos do processo.



Figura 3.8 - Conduita de ar terciário instalada na Secil no âmbito do Projeto CCL - *Clean Cement Line*.

Capítulo 4

Neste capítulo, irá fazer-se a análise do impacto que as alterações na linha IX da Secil tiveram ao nível de gestão de combustíveis. Serão analisados o consumo e logística dos combustíveis da Secil anteriormente ao *revamping* da linha e após as alterações realizadas no âmbito do Projeto CCL.

Explicar-se-á a nova instalação implementada mediante a necessidade de aumentar a capacidade de abastecimento ao Hangar O4 com CDRs e garantir que nenhum dos processos ficará sem fornecimento de combustível. Demonstrou-se todo o trabalho realizado para se construir a lógica de automação de cada um destes equipamentos a nível de programação de PLC de forma a ser possível ao operador de comando central fazer com que a instalação opere.

4.1. Combustíveis Usados na Secil

Os pontos de entrega de CDRs, na Secil, após o Projeto CCL, são o queimador do forno e a câmara de combustão do calcinador. Os combustíveis usados eram Bagaço de Azeitona, Combustíveis Derivados de Resíduos, Estilha de Pneus, *Fluid Coke*, *Petcoke* e resíduos de cortiça. A entrega do combustível para o queimador é realizada sempre de forma individual (não se mistura CDRs, *Petcoke* ou outro combustível no mesmo transporte) e em entradas específicas neste. O mesmo acontece no calcinador.

Na tabela 4.1, é possível verificar os tipos de combustíveis utilizados na Secil e respetivos PCIs. É de notar que o PCI máximo dos CDRs considerados de baixa qualidade é inferior ao mínimo projetado pela *Thyssenkrupp* para o Prepol em 4,2 MJ/Kg.

Não existe, na Secil, qualquer processo automatizado de leitura de PCI integrado no processo; são necessárias a recolha de amostras e a análise em laboratório para se determinar o PCI.

Tabela 4.1 - Poder Calorífico Inferior dos Combustíveis Usados na Secil Outão.

Tipo Combustível	Poder Calorífico Inferior (MJ/Kg)
CDRs “ <i>High Grade</i> ”	15,0 – 20,0
CDRs “ <i>Low Grade</i> ”	10,0 – 15,0
Bagaço Azeitona	20,2
Pneus	25 - 30
<i>Petcoke</i>	29,5

4.1.1. CDRs “Low Grade” e CDRs “High Grade”

Como visto no capítulo 2, os CDRs podem ser classificados mediante o seu PCI. De forma a planear a logística de entrega da Secil, este combustível foi classificado internamente como CDRs “Low Grade” e CDRs “High Grade”. Esta divisão foi feita com base no teor de humidade, sendo este inferior a 20% e superior a 20%, respetivamente.

4.1.2. Estratégia Armazenamento CDR

O hangar O4 tinha a possibilidade de funcionamento independente, tendo uma unidade de descarga de camião, e de servir de *buffer* intermédio ao hangar O4, sendo que este lhe enviava CDRs. Esta segunda possibilidade foi extinta após as alterações do projeto e os hangares ficaram isolados.

A nova estratégia de armazenamento passa por se abastecer o Hangar O2 com CDRs “High Grade” e o Hangar O4 com CDRs “Low Grade”. Esta definição foi feita devido à necessidade de se definir o destino final dos tipos de combustível; “High Grade” são entregues através de transporte pneumático ao queimador do forno e ao calcinador, enquanto “Low Grade” é entregue apenas ao Prepol.

Este *layout* permite também o envio exclusivo dos CDRs vindos do hangar O4 a uma unidade de secagem, fazendo com que se reduza a sua humidade e aumente o PCI antes de serem entregues à câmara de combustão.

4.2. Armazenamento e Transporte de CDRs na Secil

O acréscimo da utilização de combustíveis alternativos e a redução do consumo de *petcoke* exigiram a análise e alterações dos *layouts* e instalações dos processos secundários da Secil. O objetivo principal desta análise passou por garantir que o processo de transporte de CDRs ao hangar de armazenamento tem capacidade de desempenhar a sua função para a quantidade requerida para alimentar o *Prepol* e que este hangar tenha capacidade suficiente de o armazenar.

4.2.1. Armazenamento de CDRs - Hangar O4

O hangar O4, na Secil, é o local de instalação designado ao armazenamento de Combustíveis Derivados de Resíduos. Este tem uma linha dedicada ao abastecimento de CDRs e outra dedicada à extração. Nestes hangares, são armazenados, essencialmente, CDRs na forma de *pellets* e *fluffs*.

A alimentação é realizada pela parte superior do hangar, estando instalado no topo destes transportadores de arrasto; estes estão instalados parte fora e parte dentro do hangar, realizando o transporte do material para o interior do armazém.

As boxes são o espaço físico fechado dedicados ao armazenamento de CDRs no interior do hangar. Estas estão separadas fisicamente. A capacidade total de armazenamento do hangar é de

5500 m^3 , sendo que três boxes têm capacidade individual de 1000 m^3 , duas com capacidade de 900 m^3 e uma de 700 m^3 .

O combustível é armazenado no interior de cada boxe na forma de uma pilha. A disposição da pilha é fundamental para realizar a extração de combustível. A extremidade da pilha que se encontra na direção dos transportadores de extração deve ter o formato de rampa de forma a tornar o deslizamento dos CDRs eficaz. Estes deslizam para o interior dos transportadores de extração.

A inclinação da rampa é fundamental, sendo que, quanto maior for, maior a capacidade de armazenamento da boxe. No entanto, a inclinação deve ser tal que permita o deslizamento eficaz do material até à extração e não aconteça a o desabamento dos CDRs para o interior dos transportadores e consequente entupimento destes.

A grade é um equipamento instalado no interior de cada boxe. Desempenha uma função na alimentação e na extração do material. Na alimentação, a grade tem a função de construir a pilha de material. Os CDRs irão entrar na boxe por gravidade, caindo no chão. Os pentes da grade irão ser acionados, deslocando o material de forma que se obtenha a forma final da pilha. Na extração, a grade é responsável por tocar suavemente porções de material na superfície dada pilha, fazendo com que este deslize até aos parafusos de extração, na parte inferior da boxe.

Na figura 4.1, está a esquematização da instalação das boxes de armazenamento de CDRs do hangar O4. É possível ver a disposição da pilha de CDRs no interior da boxe e a posição dos transportadores de abastecimento e extração. Na figura 4.2, vê-se uma pilha real.

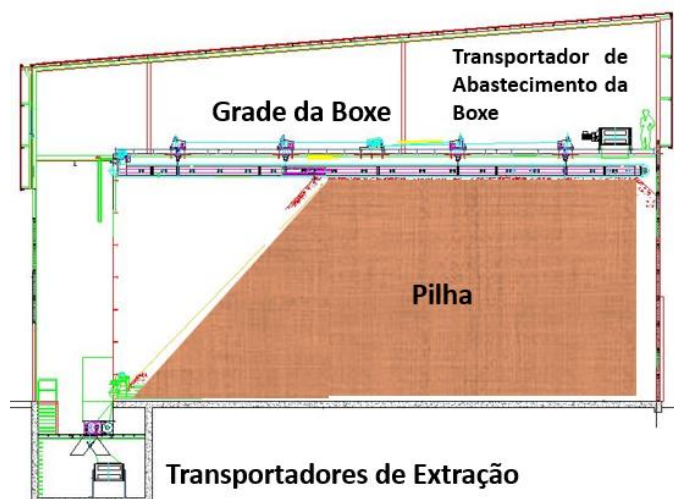


Figura 4.1 - Esquema das boxes do Hangar O4 com esquematização da pilha de CDRs e posição dos transportadores de extração, abastecimento e grade.



Figura 4.2 - Pilha de CDRs no interior de uma boxe do Hangar O4, na Secil.

4.2.2. Transporte de CDRs ao Hangar O4

Cada boxe do Hangar O4 é abastecida por uma linha de transportadores dedicada a este efeito. Na figura 4.3, está a esquematização da linha de abastecimento, representando o fluxo de material e a sua transferência entre equipamentos.

Os CDRs são fornecidos por via terrestre através de camiões. Os camiões descarregam o combustível no interior das unidades de descarga instaladas na Secil, iniciando o processo de abastecimento do hangar O4. A instalação de abastecimento está limitada ao transporte máximo de 35 toneladas, por hora, de combustível.

O interior da unidade de descarga é constituído por uma tela transportadora que irá fazendo a deslocação e remoção do combustível para o exterior. Simultaneamente, o camião vai realizando a descarga para o interior da unidade. O material é extraído pela traseira do equipamento para uma tela transportadora. Ambas as unidades descarregam numa tela transportadora comum.

O transportador de tela instalado na traseira da unidade de descarga é responsável por receber e realizar o transporte de CDRs para junto do Hangar O4. Este equipamento é adequado para o transporte no plano horizontal. Por ser aberto, permite a instalação de um separador de metais sobre este. A separação de metais é um processo integrado no processo produtivo de CDRs e SRFs, e a Secil tomou a opção de o integrar no seu processo de abastecimento de CDRs, antes do combustível ser consumido. A redundância dos processos no fabrico de CDRs não é inapropriada, visto se conseguirem obter melhores resultados. É exemplo o processo de redução de partículas com a britagem, redução do teor de humidade com a secagem ou a massa de metais com a separação magnética. Assim, a existência de um estágio de separação de metais também não o é; pode verificar-se que, apesar do tratamento do fornecedor, acontece a extração de material ferroso, na instalação da Secil.

Devido ao transporte, é comum o material ser fornecido compactado e isso é indesejado para se realizar o transporte de material com transportadores sem fim e de arrasto, devido ao risco de entupimento da mesma, causando a necessidade de paragens. A dosagem destes também se torna mais complicada de controlar. Está instalado, no fim da cinta transportadora, um crivo responsável por realizar a desagregação do material antes da sua deposição nos próximos transportadores.

Após a desagregação, o crivo deposita o material no interior de dois transportadores sem fim. Estes são utilizados para realizar a deslocação de material de baixa densidade, o que torna difícil a sua deslocação, como é o caso dos Combustíveis Derivados de Resíduos. Os transportadores sem fim transferem os CDRs para os transportadores de arrasto responsáveis por realizar a sua elevação para o topo do hangar, por onde este entra. A opção por este tipo de equipamento em relação a outro tipo de transportador, por exemplo, um sem fim, está na distância de transporte de material elevada, menor retorno de material, maior velocidade linear e inclinação possível até 45°. Estes permitem, ainda, a instalação de guilhotinas pneumáticas na sua base de forma a criar a possibilidade de extração de material por mais do que um ponto.

As guilhotinas pneumáticas instaladas na base do transportador de arrasto são importantes na escolha da boxe de deposição dos CDRs, sendo que estas abrem ou fecham consoante o operador selecione o compartimento que pretende abastecer. A abertura destas, a par com a deslocação do material no interior do transportador, irá fazer com que os CDRs caiam por gravidade no interior da boxe.

No Anexo 1, estão contidas figuras com fotografias da instalação existente na Secil, posterior às alterações do Projeto CCL.

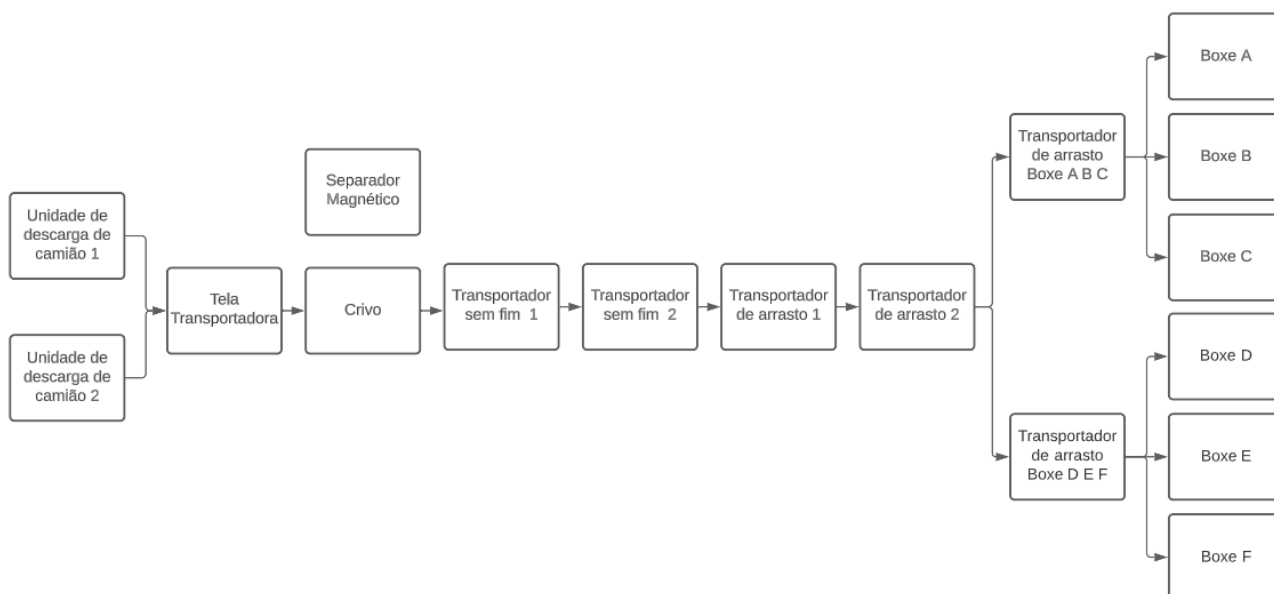


Figura 4.3 - Esquema da linha de abastecimento das boxes do hangar O4 da Secil, com identificação dos tipos de transportadores usados e fluxo do combustível.

4.2.3. Entrega CDRs “Low Grade” ao Precalcinador

Após a extração das boxes através de transportadores sem fim, os CDRs são depositados num *Pipe Conveyor*, um transportador de tela tubular. Este transporta o combustível ao longo de 355 metros e faz a sua entrega na zona de secagem.

Após sair do transportador tubular, existem duas opções para onde encaminhar o combustível, sendo a desejada para o interior do *bunker* de armazenamento de CDRs, este serve como um *buffer* intermédio que irá enviar o combustível para o interior do secador. Nesta unidade de secagem de CDRs fornecida pela *Stella*, é feito o aproveitamento dos gases quentes do forno para evaporar a água contida no combustível e, assim, reduzir o teor de humidade. Depois de secos, são enviados para o interior do silo seco, o último *buffer* instalado antes do Prepol.

A segunda opção de envio é diretamente para o silo seco, fazendo *bypass* ao secador, no caso de este estar indisponível. Após a extração do silo, o material é entregue ao calcinador, através de telas transportadoras.

4.3. Análise Consumo Hangar O4

4.3.1. Simulação Consumo CDRs Prepol

Aumentando a necessidade de CDRs para 85% do calor da operação da linha e traduzindo-se em cerca de 17 ton/h, foi necessário aferir a capacidade de toda a linha de transporte de combustíveis.

A densidade dos Combustíveis Derivados de Resíduos varia mediante vários fatores, como a composição, humidade e até o meio ambiente em que se encontra. A massa específica do material não

tem o mesmo valor quando armazenada no interior da boxe ou em transporte. Os valores aproximados são de 0,15 ton/m³ em transporte e 0,30 ton/m³ no interior do armazém. Foi importante considerar este fator para a realização dos cálculos de capacidade de armazenamento dos hangares e da capacidade de transporte dos equipamentos.

Os equipamentos instalados possuem capacidade de transporte máxima de 32 ton/h. Realizou-se uma simulação para a capacidade de abastecimento dos equipamentos às boxe ao hangar O4. Nesta simulação, tiveram-se em consideração os fatores seguintes:

- O abastecimento é realizado diariamente por 20 camiões.
- O abastecimento é realizado de segunda-feira a sábado das 8h00min às 00h00min.
- A extração de CDRs é de 27 ton/h.
- O consumo de CDRs no Prepol é de 17 ton/h.
- A alimentação e extração de CDR não acontece constantemente. O abastecimento está limitado a vários fatores, a chegada de camiões. A extração tem de ser alternada com a extração de *petcoke*, visto os transportadores serem comuns.
- Massa inicial de 500 toneladas no hangar.

No gráfico 4.4, é possível verificar que, para as condições referidas, o consumo de CDRs, numa semana, iria estar abaixo do armazenado inicialmente. Na segunda semana, irá ocorrer falta de CDRs, no hangar, devido à limitação no abastecimento, fazendo com que se tenha de utilizar outro combustível e faltando alimentação ao Prepol.

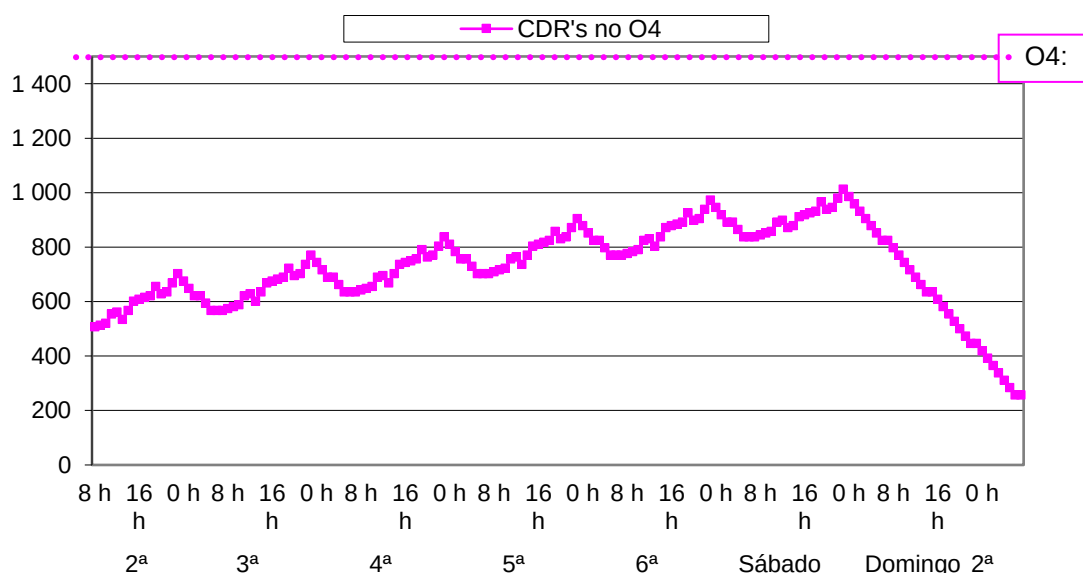


Figura 4.4 - Simulação do *stock* de CDRs para o período de uma semana de abastecimento com instalação original de abastecimento do hangar.

Ao aumentar a capacidade de transporte da linha de abastecimento, é possível ter-se dois camiões a descarregar simultaneamente. Esta foi a decisão pela qual se optou para se conseguir garantir o abastecimento de CDRs ao O4 de forma que se consiga garantir que existe sempre material

para alimentar a câmara de combustão, tendo-se realizado a opção da instalação de uma linha gémea. Esta linha tem como principal característica fazer a alternância entre o envio do combustível para o hangar, sendo capaz de alimentar apenas as boxes “D”, “E” e “F”, e o envio de CDRs para a instalação do *Energreen*. A derivação será feita com recurso à instalação de uma válvula de desvio que, através da seleção do operador, encaminhará o material. O gráfico da figura 4.5 mostra a simulação para duas linhas de abastecimento de CDRs ao hangar O4. É possível ver que, para as condições anteriores, e com o aumento do abastecimento, se consegue garantir que existe reposição suficiente no hangar para que, mesmo com a falta de abastecimento no domingo, a alimentação ao *Prepol* seja feita garantida.

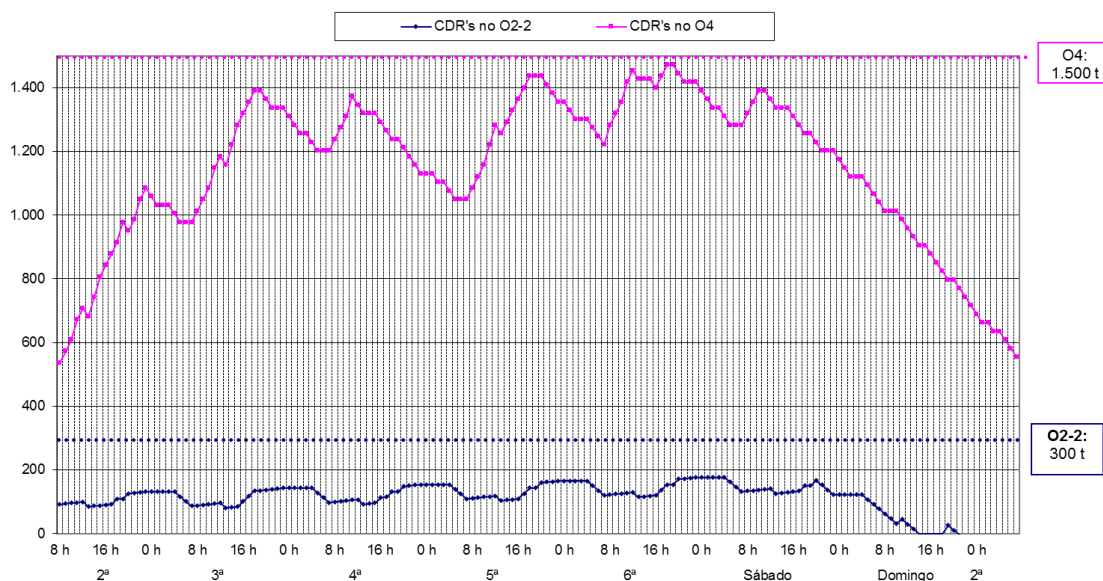


Figura 4.5 - Simulação do stock de CDRs para o período de uma semana após a instalação da nova linha de abastecimento no âmbito do Projeto CCL – *Clean Cement Line*.

A nova instalação terá um novo transportador de tela dedicado a uma descarga de camião existente, um separador magnético, um crivo, um transportador sem fim duplo, uma válvula de desvio e dois transportadores de arrasto. O esquema da nova instalação pode ser visto na figura 4.6. Pode ver-se que a nova instalação irá abastecer apenas as boxes D, E e F.

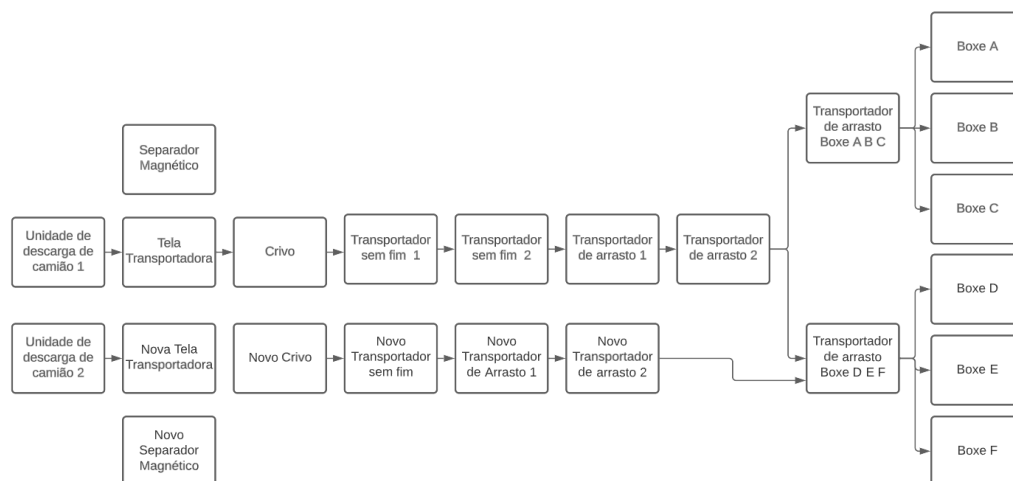


Figura 4.6 – Esquema da linha de abastecimento às boxes do Hangar O4 da Secil. Pode ver-se que foi feita a instalação de uma linha gémea da existente.

4.4. Automação da Secil

A automação é fundamental, na indústria moderna, e é graças a esta que se conseguem realizar operações complexas através de um comando centralizado. A programação lógica do PLC e da atividade de cada equipamento é essencial para se garantir que o processo produtivo desempenhe a sua função e seja capaz de se adaptar a várias situações, tornando-se flexível. A verificação de adversidades que comprometam a integridade do equipamento ou o ajuste de parâmetros necessários a cada tarefa são um exemplo disso.

Propõe-se a realização da programação da nova Linha de Descarga e alimentação de CDRs às boxes do Hangar O4. Como referido, esta linha será constituída por um transportador de tela, um separador magnético de material ferroso, um transportador sem fim duplo, e dois transportadores de arrasto; os equipamentos são fabricados pela *Di Matteo Group*.

A programação de PLCs não é recente e, na indústria cimenteira, a sua utilização é fundamental. Nesse sentido, pretendeu-se realizar a descrição do processo de construção de um programa usado num processador de PLC e verificar o avanço existente relativamente à literatura.

A linguagem mais utilizada na programação de PLC é o *Ladder Logic* e esta é usada na Secil há mais de 30 anos, pela sua facilidade de instalação, aprendizagem, leitura e adaptação.

4.4.1. Programação - Studio 5000, Rockwell Automation

O software *Studio 5000* é desenvolvido pela *Rockwell Automation* com o objetivo de realizar a programação de PLCs. Integra um conjunto de ferramentas que permitem fazer a construção, edição e simulação de todas as linguagens de programação de PLCs da norma IEC 61131-3 [69]. Realiza também a exportação do programa e por correr para os PLC da *Rockwell Studios* das gamas *Allen-*

Bradley, ControlLogix, CompactLogix e GuardLogix.

O *Studio 5000* é o *software* usado pela equipa de automação da Secil, tendo sido neste que as automações das novas instalações do projeto foram construídas, incluindo-se a linha de abastecimento de CDRs ao hangar.

4.4.2. Lógica da Programação

No capítulo 2, descreveu-se como é criada a lógica da programação nas cimenteiras e este método é usado na indústria em geral. A automação é usada para se controlar o equipamento de um comando centralizado e fazer realizar a recolha de informação do campo. Vários processos necessários à produção de clínquer e cimento são alimentados, através das instalações que lhes transportam os recursos necessários, como é o caso da alimentação de CDRs. No entanto, em caso de avaria deste sistema, o operador tem a possibilidade de inserir *Petcoke* no processo e o forno continuar a produzir. Se o transporte de clínquer à saída do forno parar, a produção terá de parar para não se desperdiçar material. O desenvolvimento destas condições é feito desde o início da operação para todos os processos existentes.

A instalação do Projeto CCL foi feita por parte de fornecedores externos, sendo a *Thyssenkrupp* responsável pela alteração da linha IX. Os equipamentos afetos ao abastecimento de CDRs ao Prepol foi fornecido pela *DiMatteo Group*. Sendo que ambas forneceram linhas completas, ambas apresentaram a sua instrução para o funcionamento automatizado de cada máquina, coube à Secil, em conjunto com o fornecedor, definir como é que cada equipamento deve reagir.

4.4.3. Sensorização

Os sensores são parte importante para a recolha de informação do campo relativamente ao estado dos equipamentos em qualquer linha automatizada. Estes ajudam a proteger os equipamentos, funcionando como alarmes, a construir a lógica de funcionamento das linhas e fornecerem informação aos operadores.

A linha de abastecimento de CDRs ao Hangar é constituída por transportadores de material dispostos em série. Neste caso, têm-se os termístores para proteção da temperatura do motor, sensores de nível, de rotação ou desalinhamento.

A sensorização instalada em cada equipamento varia mediante o seu tipo. O transportador de tela tem instalado sensores de verificação de desvios de tela, por exemplo, estes não fariam sentido nos sem-fim ou nos transportadores de arrasto. Todos os tipos são acionados através de motores elétricos, pelo que a instalação de termístores é necessária. Visto que existe descarga de material sobre todos os equipamentos, sensores de nível para medir o seu enchimento também são boa prática. Na válvula de desvio, existem, também, os sensores de posição (ou fim de curso) para definir para a posição do equipamento (ou o fim de marcha do motor) e definir para onde o material irá escoar; estes não fazem sentido em nenhum dos outros tipos.

No ato de aquisição do equipamento, é fornecido ao cliente o *Product Identification* (PID) com a

identificação de cada equipamento. Neste, consta também a informação relativa à parte elétrica e automação, descrevendo o acionamento e a sensorização constante.

4.4.4. Sequência de Arranque

Foi mantida a sequência de arranque definida pela *DiMatteo*, visto não existirem muitas questões relativamente à inserção desta instalação nova na existente. A sequência de arranque é iniciada no equipamento que entrega os CDRs à boxe e termina com o arranque da unidade de descarga. A sequência de paragem é inversa.

4.4.5. ECS Control Center

O *ECS Control Center* é um *software* usado para realizar o controlo e comando de processos industriais automatizadas em tempo real. Este realiza a interface entre a informação recolhida no campo (por exemplo, estado de equipamentos) e o operador, assim como permite ao operador pilotar o processo, dando ordens aos equipamentos. Possibilita a esquematização de todos os equipamentos e a visualização do estado dos mesmos através de um código de cores.

O ECS é usado na Secil para realizar o controlo de ambas as linhas, estando estas totalmente esquematizadas na sua interface pela equipa de automação. Foi desenvolvido pela empresa dinamarquesa *FLSmidth & CO*, derivado da sua experiência na indústria cimenteira.

Na figura 4.7, pode ver-se a sala de comando centralizado da Secil. Esta sala tem disponíveis vários computadores e ecrãs de forma a apoiar os operadores de comando centralizado na condução do processo, através do *ECS Control Center*.



Figura 4.7 - Sala de comando centralizado da Secil.

4.5. Programação Linha Abastecimento

A programação de todos os equipamentos instalados, no âmbito do Projeto CCL, foi realizada em várias fases, tendo-se iniciado pela atribuição de *Inputs* e *Outputs* (I/Os) de cada equipamento da instalação, desenvolvimento da lógica de programação em *Ladder Logics* e a implementação da linha em *ECS Control Center*. Por fim, foi feita a simulação do processo de forma a se validar o funcionamento da lógica.

4.5.1. Atribuição de Tags

As *tags* atribuídas aos equipamentos servem para lhes dar uma identidade e permitir aos trabalhadores saberem a que equipamento se referem. Na *standard* Secil, as *tags* são definidas pelo local de instalação a que o equipamento pertence, número próprio do equipamento, elemento e sinal.

O Hangar O4 tem esta designação e todos os equipamentos instalados que contribuem para este têm *tag* a começar por O4, identificando-se que pertencem ao armazenamento de combustíveis alternativos. A nova tela transportadora instalada que recebe os CDRs após estes saírem das unidades de descarga é designada por O4J21. O motor instalado designa-se como O4J21M1 (caso houvesse um segundo motor instalado neste equipamento seria designado como M2). Cada sinal de *input* e *output* adiciona uma designação a esta *tag* do equipamento, como se verá adiante.

4.5.2. Atribuição de I/Os

Os *inputs* enviam a informação dos equipamentos ao PLC e os *outputs* enviam informação do PLC para os equipamentos; esta é a forma que o PLC tem de conseguir comunicar com os equipamentos na instalação automatizada. Estes podem ser digitais ou analógicos, mediante a natureza da informação. Mediante o tipo de sinal de *input/output* (I/Os), é necessário realizar a atribuição de um módulo que fará a sua receção e emissão. Os módulos usados na Secil são os Módulos 1756-IB32, 1756-OB32 e 1756-IF16 para *inputs* digitais (DI), *outputs* digitais (OD) e *inputs* analógicos (IA). As cartas digitais garantem 32 *bits*, entre 0 e 31. As analógicas têm capacidade para 16, entre 0 e 15.

Foi necessário fazer o apanhado dos I/Os dos equipamentos a instalar na linha de abastecimento do hangar. O motor dos equipamentos tem os *inputs* digitais designados como “pronto”, “local” e “retorno” e o *output* digital “comando” como condições de funcionamento do equipamento. Estes adicionam à *tag* do equipamento os códigos C41, C51, C61 e C31. Sensores de nível, rotação ou desvio de banda são também *inputs*, visto recolherem informação do campo para o PLC e para o operador.

A nova instalação foi agregada ao PLC designado O2-O4, que é responsável por fazer o controlo dos equipamentos do Hangar O2, O4, S2 e pelos equipamentos da zona O7 instalados no âmbito do Projeto CCL, sendo estes a unidade de secagem de CDRs e equipamentos que a suportam. Assim, usou-se o chassis existente com o endereço ENB12.

A opção *standard* da Secil para se atribuir I/Os é a inserção de quatro módulos seguidos

exclusivamente para os sinais de pronto local e retorno de todos os equipamentos na instalação, correspondendo, respetivamente, ao primeiro, segundo e terceiro módulos, e o sinal de comando de todos os equipamentos na instalação no quarto módulo. Para o mesmo equipamento, é feita a atribuição do mesmo canal nos diferentes módulos. Para os restantes I/Os, foram acrescentados módulos e todos eles são introduzidos nos mesmos, por exemplo, sensores e alarmes.

Na tabela 4.2, é apresentada a tabela elaborada no *Microsoft Excel* com a contagem dos sinais da correia transportadora a ser instalada, a *tag* final de cada sinal, o tipo de sinal, a posição do módulo no *rack* onde o sinal vai ser atribuído e canal. Já existiam módulos neste endereço, estando disponíveis as posições a partir da nona. Assim, foram usadas para este transportador os módulos 9, 10, 11 e 12 para os sinais do motor e a posição 13 para restantes alarmes. Foi, ainda, definido o grupo ao qual este equipamento pertence no sistema, designando-se o mesmo por O4G22. Todo este processo foi realizado para cada equipamento instalado.

A cada sinal de cada equipamento pode atribuir-se um grupo como o objetivo de definir as sequências pelas quais as ações vão sendo realizadas ou de forma a selecionar todos os equipamentos neste, iniciar a marcha ou parar.

Tabela 4.2 - Tabela usada para atribuir *tag* e I/Os aos equipamentos instalados no âmbito do Projeto CCL - *Clean Cement Line*, e respetivos sinais.

Typ	Equipment Code	Equipment SubCode	TAG	Description	HI	Object Type	Group	Node Adr	Module Positie	Chan	Alias
	O4J21M1		O4J21M1	CORREIA TRANSPORTADORA	235	UNIMOTOR	O4G22				
I	O4J21M1	C41	O4J21M1C41	CORREIA TRANSPORTADORA\$NPRONTO		ALIAS	O4G22	ENB12	9	0	ENB12:9:I.Data.0
I	O4J21M1	C51	O4J21M1C51	CORREIA TRANSPORTADORA\$NLOCAL		ALIAS	O4G22	ENB12	10	0	ENB12:10:I.Data.0
I	O4J21M1	C61	O4J21M1C61	CORREIA TRANSPORTADORA\$NRETORNO		ALIAS	O4G22	ENB12	11	0	ENB12:11:I.Data.0
O	O4J21M1	C31	O4J21M1C31	CORREIA TRANSPORTADORA\$NCOMANDO		ALIAS	O4G22	ENB12	12	0	ENB12:12:O.Data.0
	O4J21M1	T41	O4J21M1T41	CORREIA TRANSPORTADORA\$NTERMISTOR	326	ALIAS	O4G23	ENB12	13	30	
I	O4J21M1	S41	O4J21M1S41	CORREIA TRANSPORTADORA\$NVI.G.ROTACAO		ALIAS	O4G22	ENB12	13	0	ENB12:13:I.Data.0
I	O4J21M1	C71	O4J21M1C71	CORREIA TRANSPORTADORA\$NMCC READY		ALIAS	O4G22	ENB12	13	1	ENB12:13:I.Data.1
I	O4J21D1	Z41	O4J21D1Z41	CORREIA TRANSPORTADORA\$NDESVIO BANDA 1		ALIAS	O4G22	ENB12	13	2	ENB12:13:I.Data.2
I	O4J21D1	Z42	O4J21D1Z42	CORREIA TRANSPORTADORA\$NDESVIO BANDA 2		ALIAS	O4G22	ENB12	13	3	ENB12:13:I.Data.3
I	O4J21D1	Z43	O4J21D1Z43	CORREIA TRANSPORTADORA\$NDESVIO BANDA 3		ALIAS	O4G22	ENB12	13	4	ENB12:13:I.Data.4
I	O4J21D1	Z44	O4J21D1Z44	CORREIA TRANSPORTADORA\$NDESVIO BANDA 4		ALIAS	O4G22	ENB12	13	5	ENB12:13:I.Data.5

4.5.3. Atribuição de Exportação para Studio 5000

O *Studio 5000* oferece a opção de importar informação do ficheiro *Excel* onde se fez a definição das *tags* e sinais de forma a gerar grupos e rotinas para os mesmos sinais e outputs dos equipamentos, ficando estas associadas às *tags* definidas.

Na figura 4.8, é possível ver parte das rotinas geradas no *software*. As rotinas de *output* do equipamento são apresentadas pela inserção de “M1”, referente ao motor principal do equipamento. Como explicado anteriormente, equipamentos com mais do que uns motores apresentam “M2”, “M3”, e assim sucessivamente.

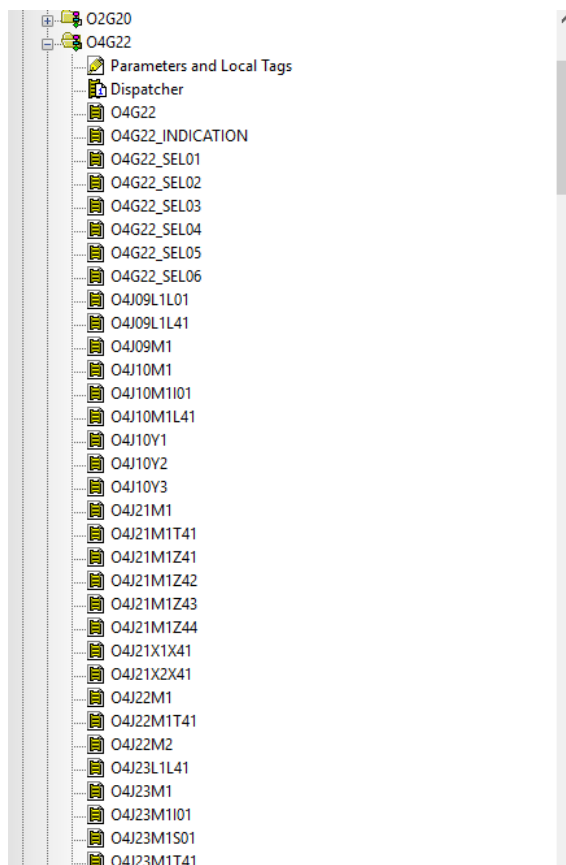


Figura 4.8 – Rotinas geradas no *Studio 5000* para a nova instalação de abastecimento de CDRs às boxes do Hangar O4. Estas rotinas estão contidas no Grupo 22, PLC O2-O4.

4.5.4. Rotinas dos motores do equipamento

De acordo com o referido anteriormente, a linguagem de programação de PLCs dominante na Secil é o *Ladder Logics*. O *Studio 5000* oferece esta possibilidade e foi com esta linguagem que se realizou a programação da linha de abastecimento de CDRs ao Hangar O4 e os restantes equipamentos a serem instalados no âmbito do projeto.

Na figura 4.9, é possível ver a rotina criada para o motor do transportador de tela O4J21. Ao se importar a lista de sinais do *Excel* para o *software*, a *tag* O4J21M1 foi definida como um Unimotor; a rotina gerada definirá a lógica que define as condições de acionamento de marcha do motor.

Na *rung* 3, apresentada na figura 4.8, pode ver-se a introdução das condições que definem o arranque do motor do transportador de tela O4J21. É possível ver que existem dois contactos abertos com as *tags* dos equipamentos O4J22M1 e O4J23M1. Como referido, a sequência de arranque dos equipamentos tem de ser feita do mais próximo da descarga final, neste caso boxes de armazenamento, para o menos próximo, as unidades de descarga. Ao colocar-se o arranque do motor do equipamento seguinte, o transportador de tela O4J21 só terá condições para arrancar quando estes iniciarem a marcha. Foram, também, introduzidos contactos abertos para os alarmes protetivos do próprio equipamento e para o sensor de nível do transportador O4J23. Deste modo, consegue definir-se que o equipamento não pode funcionar, caso o transportador para o qual os CDRs serão transferidos

esteja em alarme. Nas rotinas, fez-se também a definição das condições de paragem devido a alarmes, que podem ser vistos nas *rungs* 1 e 2 da mesma figura.

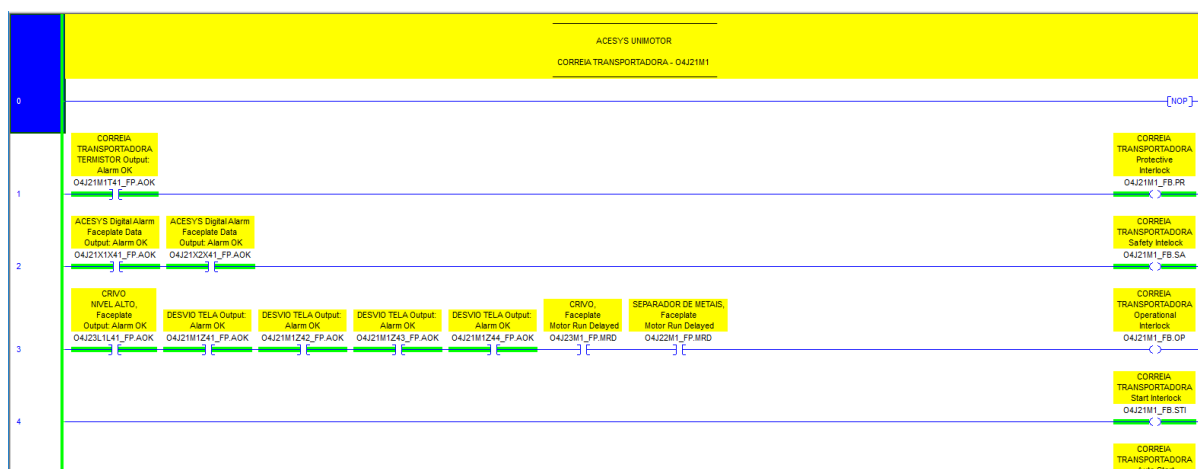


Figura 4.9 - Lógica construída em *Ladder* para o acionamento da correia transportadora O4J21. É possível ver as condições necessárias para iniciar a marcha e as condições de paragem do equipamento.

Na figura 4.10, pode ver-se a rotina de um alarme, sendo este o termístor do motor transportador O4J22M1. Nos alarmes, não é necessário criar condições lógicas. É possível ver que, para o caso de o sensor não detetar uma anomalia, irá ser emitido o “AOK” (usado no motor da máquina, como se pode ver na figura anterior). Ao contrário, será emitido o alarme. No bloco do alarme, é possível verificar o endereço ao qual o alarme está atribuído.

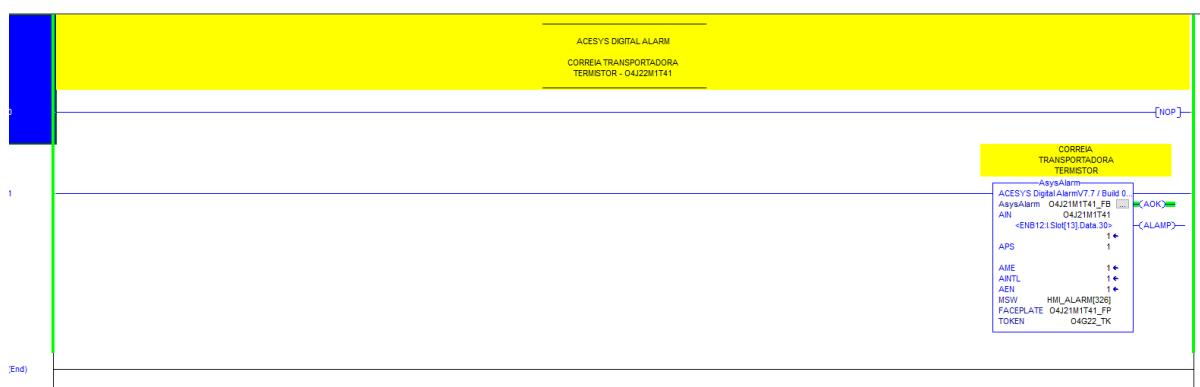


Figura 4.10 - Rotina do alarme com designação O4J22M1T41, correspondente a um termístor.

4.6. Pontos de Seleção

A instalação de CDRs instalada permite que o combustível seja encaminhado para a boxe D, boxe E, e Boxe F do hangar O4 ou para a instalação *Energreen*. Na Secil, não existe um sistema de seleção

automático; esta decisão terá de passar pelo operador e este terá de ter uma opção que adapte toda a linha à entrega de material no ponto desejado. Foram criados pontos de seleção que, ao serem selecionados, a linha se adapta para transportar material para o ponto desejado.

Tal como para cada equipamento, também para o ponto de seleção têm de existir condições lógicas para que se possa iniciar a marcha dos equipamentos envolvidos. Na figura 4.11, é possível observar a rotina da seleção de entrega de material à boxe D.

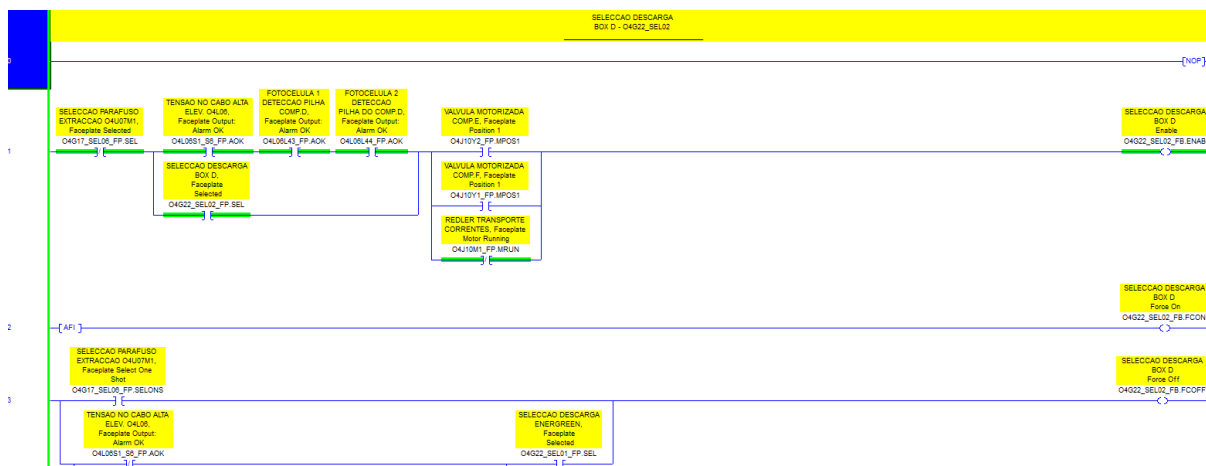


Figura 4.11 - Rotina com a lógica para seleção de armazenamento à boxe D do Hangar O4.

A válvula de desvio O4J25 é um caso particular de programação devido a ter mais do que uma posição. A sua rotina é criada através da classificação do seu motor como um *Motorgate*; o veio do motor instalado desloca-se no sentido horário e anti-horário para fazer o envio do combustível ao hangar ou à instalação do *Energreen*.

Na figura 4.12, é possível ver-se a rotina criada, sendo que se colocou as condições de seleção nos *rungs* 4 e 5. A seleção do *Energreen* irá colocar a válvula na posição 2. A seleção de qualquer uma das boxes irá colocar a válvula de desvio na posição 1, fazendo-se o ajuste automaticamente e enviando os CDRs na direção das boxes.



Figura 4.12 - Rotina criada para o posicionamento da válvula de desvio com as respetivas condições para a mudança de posição.

4.6.1. Rotina do grupo

A instalação foi atribuída ao grupo designado O4G22 e é a partir deste que o operador vai fazer o arranque da sequência. Foi criada uma rotina para este grupo, onde foram introduzidos todos os equipamentos para seleção, arranque e paragem.

Neste grupo, foram ainda definidos quatro *interlocks*, condições que têm de ser cumpridas, mas que não estão introduzidas no grupo. Na figura 4.13, é possível ver a rotina de grupo e a programação das condições de alguns *interlocks* definidos para o funcionamento do abastecimento. É possível ver que uma das condições para arranque do grupo O4G22 é a seleção da boxe a ser abastecida, de forma a adaptar a posição dos equipamentos da linha. Este ponto de seleção não é um equipamento do grupo. No entanto, caso não seja ativo, a linha fica impossibilitada de iniciar marcha.

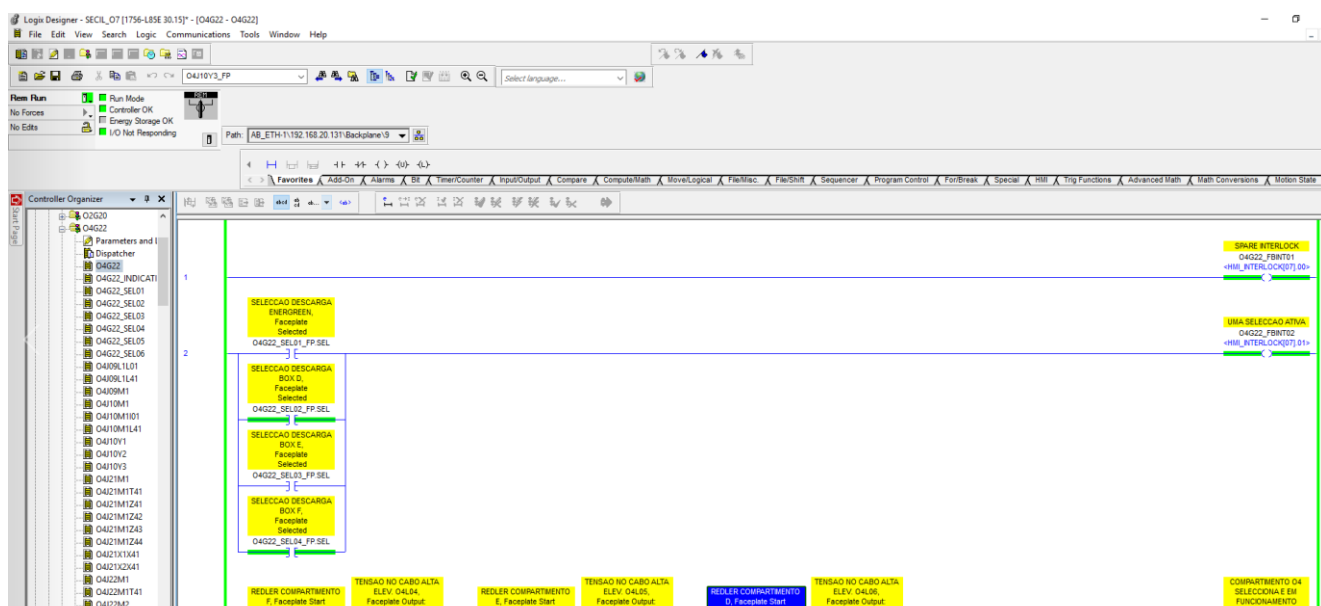


Figura 4.13 - Rotina do grupo O4G22 com as condições dos *interlocks*.

4.6.2. Rotina de simulação

O *Studio 5000* permite fazer a simulação do programa construído. A importância desta fase é testar a lógica criada e verificar se o programa construído obedece ao idealizado; pode acontecer que existam interferências de outras rotinas ou programas que impeçam a lógica de funcionar, ou simplesmente erros de programação que não permitam obter os resultados pretendidos. Esta validação é possível de ser realizada sem ter de se recorrer a equipamentos físicos, bastando usar o *software* de controlo da linha.

Na figura 4.14, está a rotina de simulação criada para os equipamentos de alimentação de CDRs ao Hangar O4 a serem instaladas. Nesta, foi colocada a simulação para todos os motores, sensores e alarmes da instalação.

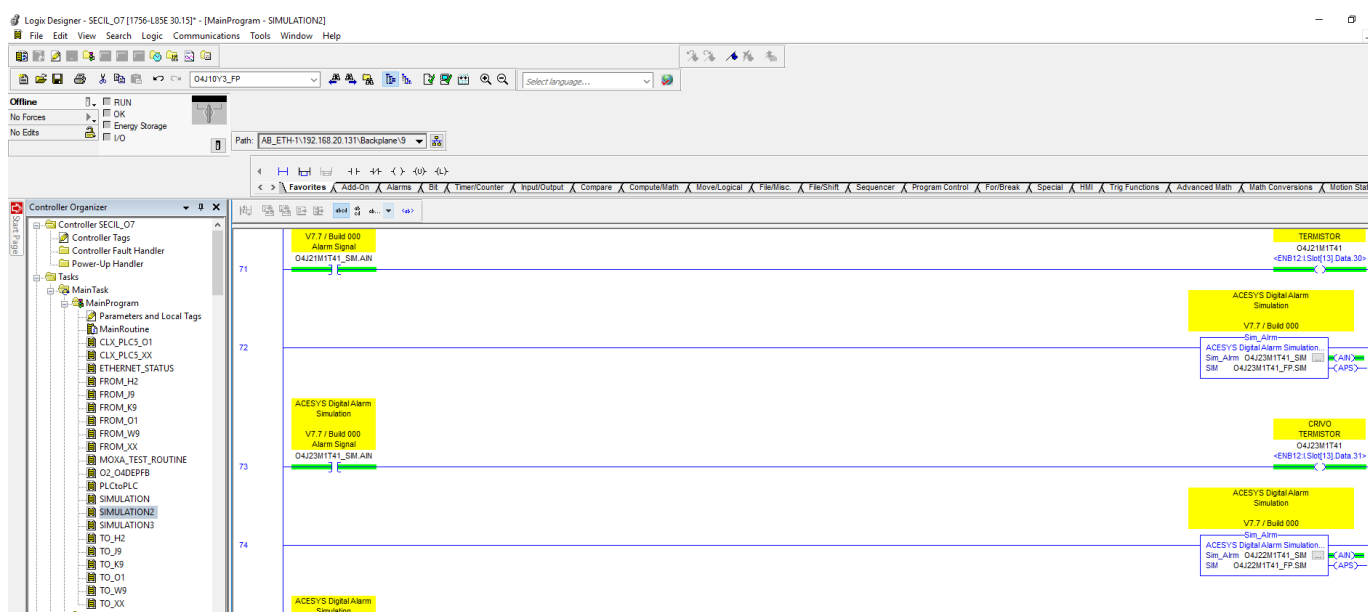


Figura 4.14 - Rotina de simulação dos sinais do grupo O4G22. Usada para simular o envio dos sinais de campo ao PLC de forma a testar a lógica de automação.

4.7. ECS Control Center

O comando centralizado na Secil é a forma de se comandarem ambas as linhas e se fazer a interação entre o operador de comando central e todos os equipamentos instalados no campo. No âmbito do projeto, foram instalados vários equipamentos com várias funcionalidades e sensores automatizados que têm de ser representados de forma que os operadores consigam observar o seu estado. A configuração deste e a representação dos equipamentos é parte dos trabalhos.

O ECS apresenta a funcionalidade de organizar as instalações por zonas, sendo esta a prática na Secil de forma a melhorar a organização. Equipamentos ligados ao forno da linha 9, tag W9, estão na janela designada W9. Ligados à moagem de cimento Z5 estão na janela com o mesmo nome.

4.7.1. Esquematização da linha

O esquema da linha deve representar a instalação da forma mais fiel quanto possível. Para isso, tentam esquematizar-se os equipamentos na ordem pelos quais eles se encontram dispostos na instalação, com inclinação, e desenhar o tamanho em conformidade relativamente uns aos outros. Existia uma instalação no hangar O4; foi necessário adicionar os novos equipamentos nesta janela, como se pode ver na figura 4.15. Este esquema da linha de abastecimento foi criado com base nos PID fornecidos pela DiMatteo. Para o operador saber a designação do equipamento, esta é escrita junto dos mesmos. Pode ver-se também junto a cada equipamento representação dos seus alarmes, representados com “L”, “T”, “Z” ou “X”. Esta representação é feita de forma a informar o operador acerca da causa de paragem da máquina e, conseqüentemente, a garantir que este consegue informar a equipa de manutenção do problema, de forma que estes o consigam identificar facilmente.

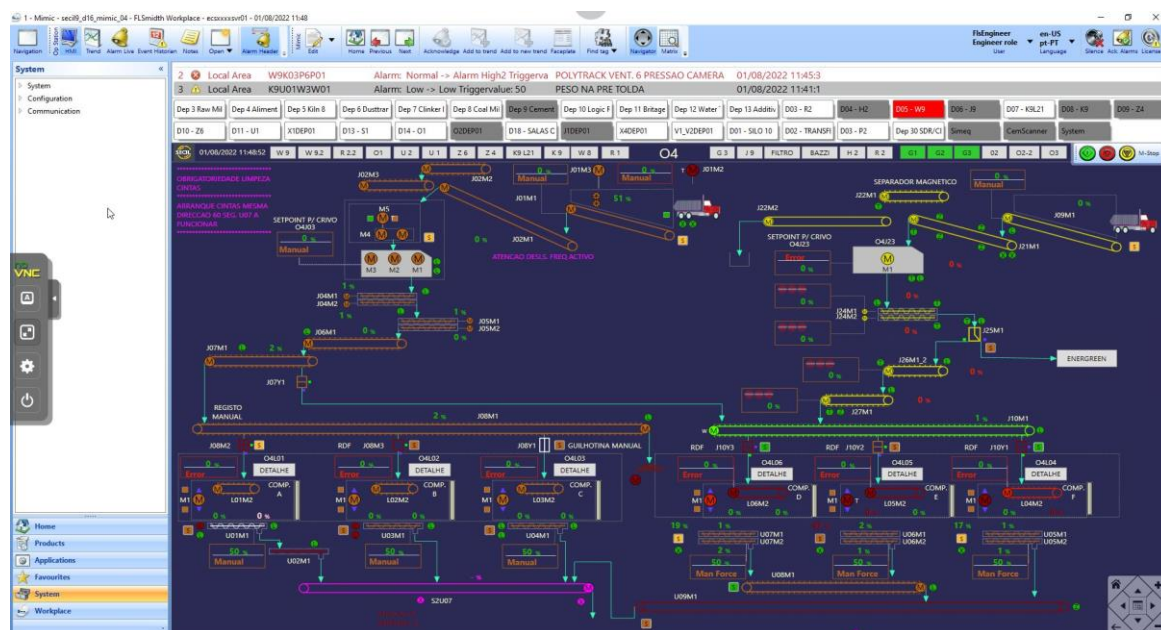


Figura 4.15 - Interface do software ECS Control Center com esquematização da linhas de abastecimento de CDRs ao hangar O4 da Secil.

4.7.2. Identificação do Estado do equipamento

É importante que o estado do equipamento seja fácil de reconhecer pelo operador e o ECS cumpre esta missão usando um código de cores. Os esquemas dos equipamentos, apresentados na figura 4.16, têm cores distintas. Estas são usadas para representar o estado do equipamento. A informação do estado dos equipamentos pode ser vista na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Cores dos esquemas dos equipamentos no *software ECS Control Center* e o seu significado.

Verde	Equipamento em marcha
Amarelo	Equipamento em arranque
Vermelho	Equipamento em alarme
Lilás	Equipamento em paragem
Castanho	Equipamento parado

4.7.3. Simulação ECS Control Center

Outra funcionalidade apresentada pelo *software* é a realização de simulação do funcionamento da lógica dos equipamentos sem afetar o campo. É possível verificar sequências de arranque, paragem e alarmes, sem se afetar os equipamentos no terreno. Na figura 4.16, está o menu com as opções de simulação do equipamento O4J26M1_2. Mediante a seleção ou não seleção de cada opção, é possível verificar como a restante linha se adapta aos *inputs* recebidos. Um alarme ativo neste equipamento terá, obrigatoriamente, de parar todo o circuito de abastecimento.

No *software* de controlo, é comum existirem janelas para seleção e monitorização do estado dos equipamentos. Os equipamentos novos foram adicionados a uma janela existente, como se pode ver na figura 4.17. Nesta, pode ver-se o estado de cada equipamento no grupo definido, O4G22, e fazer-se a seleção deste para arranque ou paragem. Pode-se, também, neste grupo, seleccionar a boxe que se pretende abastecer usando o ponto de seleção disponível na interface.

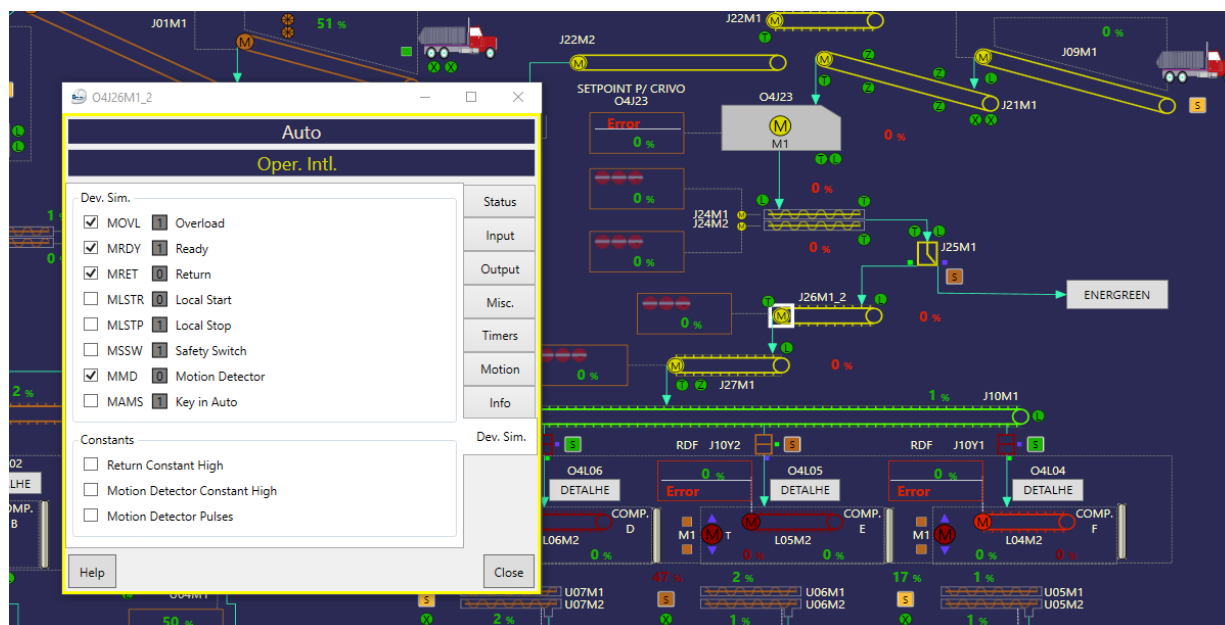


Figura 4.16 - Painel de simulação de sinais do ECS Control Center.



Figura 4.17 - Página criada ECS Control Center de gestão de equipamentos responsáveis pelo transporte de combustíveis alternativos para a Linha VIII e Linha IX da Secil.

4.8. Metodologia e Resultados *Near Infrared*

Um parâmetro eficaz para se aferir a qualidade do combustível adquirido é a medição do poder calorífico inferior (PCI). O PCI é a quantidade de calor libertada ao se realizar a combustão de uma determinada massa de combustível, considerando o seu teor de humidade, geralmente expresso em quilocalorias por quilograma (Kcal/Kg). Destacam-se a composição química do combustível, a sua massa e o teor de humidade como parâmetros relevantes para o cálculo do PCI.

O interesse na medição do PCI transforma-se na capacidade de garantir que o combustível entregue pelo fornecedor cumpre os parâmetros de qualidade requeridos; esta possibilidade facilmente evolui para novas formas de fazer a gestão do combustível.

Na Secil, o PCI dos combustíveis usados é medido pelo Laboratório de Qualidade do Outão (LQLO) com recurso à recolha e análise de amostras. A medição do PCI *in line*, ou seja, quando estes estão a ser transportados e em tempo real, é um desafio. Ter-se-ia como vantagem a leitura de PCI de uma amostra maior e mais abrangente. Com este objetivo, neste capítulo, descreve-se o processo para a identificação de tecnologias de medição de PCI de CDRs *in line* e irão avaliar-se as condições existentes na fábrica da Secil para sua implementação.

4.9. Requisitos Técnicos de Monitorização de PCI – CDRs

Como referido, a composição dos CDRs é heterogênea, contendo papel, têxteis, materiais poliméricos, e material indesejado, como metais, material rochoso ou cerâmico. A sua granulometria não é homogênea e existe humidade. Todos estes fatores são possíveis de verificar analisando o mesmo lote de material.

Tendo duas linhas de produção de cimento em operação 24 horas por dia, o fornecimento de CDRs é realizado várias vezes e os lotes são armazenados em boxes comuns, o que ainda aumenta a heterogeneidade da composição dos combustíveis. Acontecem variações também no teor de humidade do combustível, mediante o meio ambiente a que estão expostos.

Assim sendo, a solução a implementar para a medição do PCI do combustível terá de ser capaz de medir o caudal mássico de combustível, as dimensões das suas partículas, a sua composição e o tipo de resíduo constituinte e o teor de humidade. É necessário conseguir o teor de cloro, com o objetivo de se conseguir controlar a formação de aglomerados nos ciclones superiores, que causam o seu entupimento. Tudo isto terá de ser feito com o combustível em circulação.

4.10. Estado tecnológico da solução

Foi realizada uma pesquisa de mercado, com base nos parâmetros técnicos de análise colocados anteriormente e de acordo com o pretendido para os locais possíveis de instalação. Apesar de a tecnologia NIR aplicada à leitura de CDRs ser recente e experimental, os três fornecedores que se destacaram foram a *STEINERT*, *LLA Instruments* e *EVK*, devido ao cumprimento dos requisitos e ao seu conhecimento na área de utilização de CDRs no processo de produção de cimento.

O fornecimento resume das características dos sensores propostos pelos fabricantes referidos pode ser visto na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação entre sensores propostos por Steinert, LLA e EVK.

Propriedades		STEINERT (+ GRUMAN, PT)	LLA + ThyssenKrupp Industrial Solutions	EVK
Tipo de tecnologia		NIR-HSI	NIR // NIR-HSI	NIR-HSI
Gama espectral		0,8 μm – 2,5 μm	1,36 μm - 2,2 μm // 0,95 μm ~ 2,2 μm	0,9 μm – 1,7 μm
Tamanho de partículas		20 mm – 50 mm	>20 mm // <20 mm	(A gama dos tamanhos das partículas detetáveis dependerá da largura da linha)
Parâmetros de Controlo	Poder Calorífico (MJ/kg)	✓	✓	✓
	Humidade (%)	✓	✓	✓
	Composição do material (%)	✓ (opcional)	✓	✓
	Teor de Cloretos (%)	✓	✓	✗ (Possibilidade de integração por cálculo)
	Quantidade de material (wt%)	✓ (opcional)	✗ (Sugestão de colocar uma balança de correia para controlo de massa total)	✗ (Possibilidade de integração por cálculo)
Camada de material máxima no tapete		100 mm	150 mm	-
Largura de tapete		1000 mm – 2800 mm	800 mm – 2800 mm	Não especificado
Detecção simultânea de vários materiais		Sim *depende da base de dados	Sim *depende da base de dados	Sim *máximo 8 classes de materiais *depende da base de dados
Taxa de varrimento (Hz)		Não especificado	30-70 Hz // 270-795 Hz	446 Hz (full frame), até 1000 Hz
Limites de humidade de operação (humidade relativa do ar)		Não especificado	20% - 90% // 20% - 80%	8% - 80%
Temperatura de operação		5°C – 50°C	5°C – 55°C	0°C – 50°C
Taxa de apresentação de dados		Dependente do software de processamento de dados		
Plataforma de aquisição/transmissão de dados		PCL ou dispositivo de bordo		
Observações		Não deteta materiais escuros; Não aplicável a pellets; Apenas aplicável a correias transportadoras e balanças de correia.		
Aplicações		- Triagem de resíduos sólidos.	- Triagem de resíduos sólidos; - Controlo de qualidade online de combustíveis / previsão da qualidade do combustível.	- Indústria alimentar; - Indústria Farmacêutica; - Indústria do Minério; - Triagem de resíduos sólidos urbanos.
Atualização da base de dados		Via remota	Via remota	Via remota
Calibração		Automática (dinâmica)	Sem necessidade	Sem necessidade
Protocolo de comunicação		Profibus	Profibus	Profibus

4.10.1. STEINERT

A *Steinert* é uma empresa alemã fundada em 1889. Esta destaca-se no mercado da separação de resíduos, razão para a Secil a ter consultado em busca de uma solução para a leitura do PCI dos CDRs. O equipamento proposto pela *STEINERT* tem capacidade de leitura de em deslocamento com velocidade máxima de 1,5 m/s e inclinação máxima de 5°. A largura do transportador também é um parâmetro crucial para a leitura, sendo que este valor terá de estar contido entre os 1000 e 2800 milímetros.

A *STEINERT* destacou-se, visto que o mesmo sensor tem capacidade de medir a composição do material, humidade e composição de cloro, recorrendo a uma base de dados que servirá como modelo de comparação entre os resultados obtidos e a classificação final. Esta análise será aliada à massa de combustível em transporte no equipamento e consequente, conseguindo-se obter o PCI em tempo real.

As limitações observadas estão na cor e no volume de material para o qual se necessita de realizar a leitura. Toda a radiação emitida será absorvida para o caso de materiais de cor preta, o que faz com que o sensor não devolva sinal. Para além disso, a leitura não penetra na camada superficial do material, sendo que o valor de PCI obtido não será real para o amontoado de combustível em transporte.

Na figura 4.18, é possível ver o sensor NIR desenvolvido pela *Steinert* e a sua interface de controlo dos parâmetros medidos.



Figura 4.18 – Sensor *Steinert* para medição da qualidade de CDRs (a) e interface de controlo dos parâmetros (b).

4.10.2. LLA Instruments

Uma vantagem que o equipamento da *LLA Instruments* apresenta relativamente à alternativa anterior é a possibilidade de se instalar o sensor tanto sobre o transporte horizontal de combustível, como em pontos de transferência dos CDRs entre transportadores. A altura de material é limitada a 150 milímetros e a largura de transporte tem gama superior, entre os 800 e os 2800 milímetros.

A *LLA Instruments* foi a opção recomendada pela *Thyssenkrupp* para leitura da composição dos CDRs na Secil. O uniSPEC1.9MPL-24V é um sensor que usa tecnologia NIR/NIR-HSI.

Tratando-se de uma leitura no espectro infravermelho, as limitações apresentadas pelo fornecedor são idênticas, tendo incapacidade de realizar a leitura de objetos de cor preta e de ler para além da superfície do material. Fica ainda atrás da proposta anterior, devido à sua incapacidade de distinguir as várias matérias presentes na mistura de CDRs. É incapaz de ler o caudal mássico de matéria; em transportadores de tela, a instalação de células de carga abaixo da tela é uma opção viável para a leitura da massa de material.

Ao comparar na generalidade as duas soluções, uma das principais diferenças encontra-se no facto de o equipamento recomendado pela *ThyssenKrupp* não ter capacidade para obter dados relativos ao tipo de material e às suas características. Contudo, poderá ser possível quantificar o valor que o volume destes materiais representa no conjunto, para que esse dado seja utilizado na aproximação do PCI instantâneo total.

Na figura 4.19, é possível ver uma amostra de CDR monitorizada pelo sensor da *LLA Instruments* e a interface de leitura desses parâmetros.

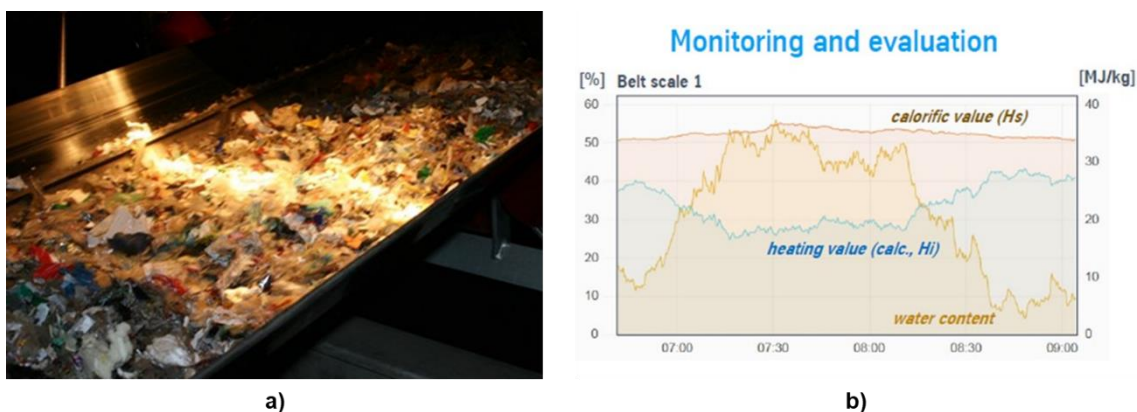


Figura 4.19 – Análise de amostra de CDRs com o sensor da *LLA Instruments* (a) e interface com os parâmetros de controlo em tempo real (b).

4.10.3. EVK

Semelhante à solução apresentada pela *LLA Instruments*, o *EVK HELIOS* é uma solução cuja leitura é possível tanto em transporte horizontal como em zonas de transferência entre transportadores e a gama de largura para leitura é semelhante às descritas anteriormente.

O *EVK HELIOS* também tem por base a tecnologia NIR. Este engloba um *software* próprio de processamento de dados, *EVK SQALAR* é uma base de dados que servirá de comparação com o material a ser lido em tempo real. Esta base de dados terá de ser alimentada após a instalação com 100 leituras de amostras de CDRs provenientes da Secil e este sensor permite a classificação de, no máximo, oito tipos de materiais diferentes.

Semelhante ao que acontece anteriormente, existe a incapacidade de leitura de material com cor preta. No entanto, uma das principais limitações deste sensor está na impossibilidade de leitura da massa de material ou do teor de cloro, sendo necessário recorrer a 91 algoritmos adicionais para este último parâmetro. Outro problema significativo está na necessidade de atualizar a base de dados; caso a composição do material divirja do pretendido, esta requer uma nova alimentação que servirá como uma calibração do sensor.

4.11. Limitações NIR – Equipamentos Propostos

Uma limitação comum observada nos equipamentos propostos pelos três fornecedores é a impossibilidade de leitura de materiais de cor preta e a dificuldade de ler material não superficial. É possível concluir que todos os equipamentos propostos irão apresentar uma lacuna que o impede de cumprir com todos os requisitos propostos.

4.11.1. Contorno Limitações NIR – Equipamentos Propostos

A limitação da cor poderia ser contornada utilizando câmaras para leitura no espectro do visível, conseguindo fazer-se a distinção entre o material e a própria tela utilizada para o transporte.

A instalação de sistemas de medição de massa e/ou volume pode auxiliar os equipamentos na segunda dificuldade. Em todo o caso, a existência de lacunas continua a existir e é fundamental o estudo da implementação de soluções para se conseguir complementar estas falhas.

A sensorização atua de forma competente nesta área. Esta poderá atuar na medição da massa em circulação no transporte de forma a se obter o valor do PCI. A detecção de imagem, como referido anteriormente, possibilita a leitura de resíduos de cor preta de forma que estes não passem despercebidos à montagem.

4.11.2. Complementos Sensorização NIR

Para se alcançar a I4.0, existem vários métodos criativos que se poderão instalar para tirar partido da vantagem de leitura do PCI de CDRs. A leitura do PCI em vários pontos seria ótima, sendo que existem variações do mesmo quando este está exposto ao ambiente no interior das boxes ou no transporte.

A variação da velocidade de alimentação de CDRs à câmara de combustão do calcinador permite que o sistema gira automaticamente a entrega de combustível de forma a se manter a temperatura desejada, sem ter de haver interferência do operador, e com vista à poupança de combustível. A variação da rotação da balança doseadora instalada abaixo do silo de CDRs seco constitui igualmente uma boa solução.

A medição da massa e/ou volume do material na descarga em conjunto com a leitura realizada pelo sensor NIR seria também um bom indicador na validação de resultados, visto esta se relacionar com o PCI. Seria possível detetar a quantidade de combustível abastecido em tempo real.

O sucesso da implementação do sistema de leitura de material de cor preta permite aperfeiçoar os resultados obtidos. Permite também comparar em tempo real os resultados com os obtidos, caso não fosse feita esta leitura.

A medição da humidade ao longo da linha permite observar como esta varia em várias etapas. A medição do PCI dos CDRs anteriormente e posteriormente à unidade de secagem seria bastante importante para se aferir os benefícios e eficácia da secagem do combustível. O mesmo acontece após as unidades de descarga, sendo que seria possível a validação da qualidade dos CDRs entregues.

4.12. Otimização Sensorização NIR – Sistema de *Bypass*

A otimização do sistema de realização da recolha do poder calorífico através do sensor em questão poderia ser através da instalação de um *bypass* para uma amostra de material, leitura e reinserção do material no trajeto. Dessa forma, iria conseguir-se a atenuação da condicionante da leitura superficial do material, da dificuldade de seleção de um ponto na linha para leitura e do amontoamento do combustível pela massa dos constituintes.

4.13. Desenvolvimento de conceito NIR

Para colmatar as limitações apresentadas pela tecnologia do tipo hiper espectral, a Secil, em conjunto com a *Perkin Elmer*, testou um novo conceito para a aplicação de um sensor NIR para a leitura do PCI de CDRs.

Para tal, utilizou-se como base de estudo um sensor laboratorial DA 7250 da *Perkin*. Realizou-se um estudo prévio de viabilidade com base em 14 amostras de CDRs.

A realização da atividade experimental teve como objetivo a determinação de uma equação de regressão linear que possibilite a relação entre os valores obtidos das amostras e os resultados obtidos pelo Laboratório de Qualidade do Outão. O método usado foi a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). Os resultados podem ser vistos na figura 4.20, tendo-se concluído que os resultados obtidos para a medição do sensor e LQLO seguem a tendência.

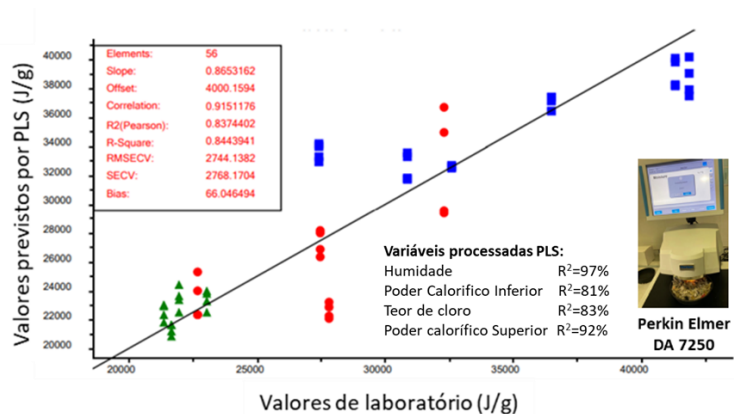


Figura 4.20 – Correlação entre os valores previstos pela leitura NIR e valores obtidos pelo Laboratório de Qualidade do Outão.

4.14. Levantamento de pontos de leitura – DA 7250

A medição do PCI do combustível está dependente de vários fatores inerentes ao mesmo. Tendo-se o objetivo da recolha dos dados de poder calorífico dos CDRs “*Low Grade*” numa linha em que este combustível se encontra em circulação, o ponto e a posição de implementação do sensor são dos pontos fundamentais.

Com base no estudo apresentado anteriormente entre a Secil e a *Perkin Elmer*, foi realizado um levantamento de possíveis pontos para se instalar o sensor DA 7250. Por imposição da tecnologia, é necessário que a lente do sensor contacte com o combustível e nesse sentido a escolha da localização e posição da instalação na linha não se torna uma tarefa óbvia. Transportadores com superfícies abertas e espaçadas são os que reúnem as melhores condições para a realização desta instalação, tendo-se os transportadores de tela como a melhor opção para este efeito na linha da Secil.

Um transportador de tela é usado para o transporte de material sólido. O material a ser transportado é depositado sobre uma tela de borracha instalada envolvendo duas polias, sendo uma delas motora, e circula sobre rolos ao longo do seu percurso. O deslocamento é feito com recurso à instalação de um motor na polia motora. A sua capacidade depende das características da tela, do material e da disposição dos rolos sobre os quais esta circula. Geralmente estas são descobertas por cima e é depositado material sobre estas com caudal constante, ficando o volume distribuído homogeneamente pelo seu comprimento.

Consideram-se adequados quatro pontos de recolha de dados na instalação da Secil, sendo a estação de descarga de CDRs ao hangar O4, a correia transportadora que faz a receção dos CDRs da cadeia de descarga, a cinta tubular que transporta os CDRs ao secador e a tela transportadora de alimentação do Prepol.

4.14.1. Estação Descarga CDRs

A estação de descarga de CDRs, onde o camião do fornecedor os deposita, é uma possibilidade de instalação do sensor. É constituído por uma estrutura à qual o atrelado do camião encosta e descarrega os CDRs sobre uma correia transportadora. A estrutura tem uma abertura na parte oposta à da descarga por onde o combustível é extraído. É possível ver a estação de descarga na figura 4.21.

A vantagem de usar este ponto para leitura é a possibilidade de medição do PCI, após estes serem recebidos pelo fornecedor, e verificar se a sua qualidade está de acordo com o especificado, antes de este estar em transporte ou armazéns. A desvantagem é a nivelação do material; sendo um ponto de descarga do camião, irá existir acumulação do material que pode impedir de se realizar a leitura na superfície do material como é requerido. Esta acumulação pode também danificar o equipamento devido à abrasão.



Figura 4.21 - Unidade de descarga de CDRs da Secil Outão.

4.14.2. Correia transportadora da estação de descarga

Abaixo da estação de descarga, está instalado um transportador de tela para onde os CDRs são transferidos. A sua velocidade de transporte é de 1,5 m/s e, neste ponto, seria possível a validação das características do material fornecido. Outra vantagem que apresenta é o material ser depositado nesta com um caudal mais regular, fazendo com que o nível do material se mantenha e a recolha dos dados seja facilitada.

Na figura 4.22, é possível ver o ponto de leitura na correia transportadora instalada após a estação de descarga.



Figura 4.22 – Transportador de tela que recebe os CDRs da unidade de descarga. Constitui um ponto de leitura eficaz devido a ser aberto.

4.14.3. Correia Transportadora Tubular

O terceiro ponto de recolha de dados possível é a tela tubular instalada no âmbito do Projeto CCL para o transporte de CDRs após estes serem extraídos das boxes. Este tipo de transportador constitui uma inovação na Secil, prolongando-se ao longo de 377 metros. Sendo um transportador tubular, é constituído por uma correia transportadora de borracha com a principal característica de circular no interior de três rolos dispostos na posição de um triângulo equilátero, forçando a tela a ficar numa disposição cilíndrica com secção de 250 milímetros de diâmetro que se assemelha a um tubo. Na zona de receção de material, a configuração dos rolos é a que se observa comumente, circulando esta aberta e indo sendo fechada gradualmente com o avanço. Na zona de descarga a tela abre, entregando o material ao próximo estágio.

Na correia transportadora tubular, a zona de colocação do sensor deve ser perto da entrega onde esta abre, como se pode ver na figura 4.23. Tem-se como vantagem conseguir recolher dados de todo o material vindo do hangar O4. Saindo deste transportador, o material será entregue a uma unidade de

secagem. A leitura da humidade consegue apoiar a decisão de se enviar o material para secagem ou de se saltar esta etapa. Tem como principal desvantagem a velocidade de avanço de 3,0 m/s, que dificulta a recolha correta de dados.



Figura 4.23 – Troço de transferência de material de CDRs à zona de secagem. Ponto de leitura válido devido à facilidade de instalação do sensor na estrutura.

4.14.4. Tela transportadora de entrega ao Prepol

A leitura do PCI à entrada no Prepol também tem interesse, sendo que possibilita ao operador de comando do forno o apoio na decisão de envio de outros combustíveis ao calcinador e a regulação da quantidade. Esta leitura pode ser realizada com a instalação do sensor NIR na correia transportadora de entrega de combustível ao Prepol, mostrada na figura 4.24.

A principal desvantagem da instalação do sensor NIR nesta tela reside no *layout* da instalação. Este transportador recebe CDRs e estilha de pneus, sendo estes enviados juntos para o calcinador. Devido à cor, é impossível estimar o PCI inserido pela massa de pneus, sendo os valores imprecisos.



Figura 4.24 - Tela transportadora de alimentação do Prepol.

Capítulo 5 – Conclusão

O grande objetivo do Projeto CCL foi o *revamping* da Linha IX da Secil. No âmbito do projeto, foi instalado um calcinador no processo com o objetivo de aumentar a eficiência da calcinação. Com este, veio a instalação de uma câmara de combustão para lhe fornecer calor e que permite a queima de combustível de poder calorífico inferior aos combustíveis considerados de pior qualidade.

Após análise, foi possível concluir que a logística de armazenamento e transporte de Combustíveis Derivados de Resíduos na Secil era ineficiente. O abastecimento de CDRs ao hangar O4 era feito de forma insuficiente para o consumo que se teve. Assim, foi necessária a projeção, programação e instalação de outra linha que permita o abastecimento de CDRs de forma que estes não falem ao processo. A programação desta linha foi realizada com recurso a *Ladder Logics*.

Com o acréscimo da utilização de CDRs, pretende-se realizar a verificação da qualidade do combustível recebido em tempo real e *in line*, não sendo necessário recorrer a amostras. A tecnologia NIR é capaz de desempenhar esta função através da utilização de espectroscopia. A recolha dos dados foi analisada de forma a se conseguirem obter pontos de aplicação possíveis e as suas desvantagens.

5.1.1. Utilização de Combustíveis na Secil

A implementação do calcinador e da câmara de combustão (figura 3.5) permitiu a alteração da logística de combustíveis da Secil. Relativamente ao balanço do consumo térmico dos combustíveis, anteriormente às implementações do Projeto CCL a taxa de utilização de *petcoke* era de 45%. A utilização de combustíveis alternativos aos fósseis era de 55%, dos quais 31% eram CDRs. Após o *revamping* da linha, o consumo de combustíveis fósseis decresce para os 15%, sendo que se tenciona reduzir o seu consumo das 43.000,00 ton/ano para 21.000,00 ton/ano.

5.1.2. Upgrade linha de abastecimento do Hangar O4

A análise da capacidade da linha de abastecimento do hangar O4 permitiu concluir que a capacidade de transporte dos equipamentos era insuficiente para se conseguir acumular combustível suficiente de modo a manter o funcionamento do Prepol.

Como se pode ver na figura 4.3, a simulação foi iniciada com um *stock* de 500 toneladas de CDRs. Após uma semana de funcionamento, a massa de material em armazém era de cerca de 200 toneladas, demonstrando que o balanço do abastecimento semanal é negativo. Ao fim da segunda semana, a massa de CDRs armazenados seria inexistente, findando a operação com o calcinador, obrigando a reduzir a marcha ao forno e a produção e alterando o padrão das emissões.

A solução passou pela instalação de uma linha de abastecimento gêmea da existente. A nova instalação irá permitir ter dois camiões a realizar a descarga simultaneamente, duplicando o

abastecimento e garantindo que, após uma semana de consumo, o nível de *stock* se mantém e a linha 9 continua a operar (figura 4.4).

5.1.3. Método de Programação

Diferente de uma linha de produção automóvel, por exemplo, as linhas de produção da Secil funcionam completamente sem a necessidade de operadores. Foi necessário realizar a programação de toda a nova instalação e adaptação do funcionamento da mesma à linha existente. Foi possível concluir que o método de programação na área do cimento se mantém quando comparado com a literatura.

As sequências de arranque de grupos de equipamentos são feitas da máquina do fim da linha para a máquina do início da linha de forma a evitar-se a transferência de material para equipamentos parados. A sequência de paragem é feita de forma inversa à de arranque, parando-se os equipamentos do mais longe da descarga para o mais próximo.

Pode concluir-se que a instrumentação é parte fundamental no controlo do processo automatizado. No processo de produção de cimento, a sensorização é utilizada para se lerem posições, nível de enchimento, temperaturas, rotações, vibrações e outros fatores. Estes têm influência tanto na ação da máquina como na proteção da sua integridade. Os sensores de nível, por exemplo, garantem que não acontecem encravamentos de transportadores e perdas de material. Os sensores de posição regulam a posição da máquina de forma a conseguir adaptar a linha a diferentes funções. Os termístores são uma proteção de temperatura do próprio motor, evitando que este queime. Os arames de segurança têm a função de proteger pessoas e, quando puxados, param o funcionamento da máquina.

5.1.4. Programação Ladder Logics

Toda a programação das máquinas instaladas no âmbito do Projeto CCL foi realizada utilizando o *software Studio 5000 da Rockwell Automation*. Foi possível concluir que a programação *Ladder* é uma solução eficaz para desenvolver a lógica de funcionamento automatizada de máquinas.

No decorrer deste trabalho, foi possível fazer a programação da nova linha de abastecimento de CDRs ao hangar O4 da Secil. Esta programação é realizada para cada equipamento individualmente. Na rotina de cada máquina, são inseridos os *inputs*/condições para que uma máquina inicie ou finde a sua marcha. Estes *inputs* englobam o estado de sensores e de outros equipamentos.

Pode concluir-se que as grandes vantagens da *Ladder Logic* é a facilidade em se trabalhar com a mesma, visto ser uma linguagem de programação gráfica. Esta é fácil de aprender, ler, adaptar e simular o processo produtivo.

5.1.5. Desenvolvimento Conceito NIR

Pode concluir-se que, apesar de apresentarem limitações, os sistemas *Near Infrared* conseguem ser eficazes na leitura do poder calorífico de CDRs. Este valor é obtido através da análise espectroscópica da composição química dos CDRs.

Foi feita a consulta de soluções para realizar a leitura do PCI de CDRs *in line* no processo produtivo da Secil. As três empresas consultadas para o fornecimento da tecnologia NIR foi a *Steinert*, LLA *Instruments* (através da *Thyssenkrupp*), EVK e a *Perkin Elmer*. De modo geral, as características das opções consultadas são semelhantes. As gamas de leitura mais abrangente são as da *Steinert*, entre 0,8 e 2,5 μm . Concluiu-se que a largura do transportador e a velocidade a que o combustível circula são condições de peso para uma leitura correta. No caso da EVK, a granulometria do material que pode ser lida depende diretamente da do transportador.

No âmbito da leitura do PCI, a Secil, em conjunto com a *Perkin Elmer*, concluiu que a utilização do Sensor DA 7250 constitui uma opção viável para a realização da leitura do PCI de CDRs. Esta conclusão é baseada na atividade laboratorial descrita anteriormente, onde se conseguiu estabelecer uma regressão linear forte entre os valores medidos pelo Laboratório de Qualidade do Outão e o sensor em questão.

5.1.6. Pontos de Leitura

Neste trabalho, foi possível tirar conclusões acerca de limitações da tecnologia NIR para a recolha do PCI *in line*. É possível verificar que a leitura é apenas realizada na camada de material na superfície. É também impossível a leitura de material de cor preta e este não se distingue da tela, pelo que irá introduzir erros na medição. Por fim, fatores como a largura da tela e velocidade de circulação têm influência no processo de leitura (ver tabela 4.3). Também se conclui que a realização de leituras em pontos de transferência de material entre transportadores é ineficiente devido à existência de espaço entre as partículas. O sensor da Perkin Elmer tem ainda como desvantagem a necessidade de existir contacto entre a lente e o material para haver recolha de dados.

Com base nas limitações, foi realizado um levantamento de possíveis pontos de leitura para este sensor. Verificou-se que existem pontos de recolha de dados com potencial. No entanto, apresentam as desvantagens descritas anteriormente. A única opção de instalação passa por transportadores de tela, visto estes serem abertos por cima e permitirem o contacto entre a lente do sensor e o combustível. No entanto, a velocidade de circulação do material, cor e largura da tela irão constituir sempre desvantagens.

Bibliografia

- [1] Secil S.A., “Secil - Relatório de Sustentabilidade 2018/2019,” 2019.
- [2] Secil S.A., “Relatório de Sustentabilidade SECIL: Sólidos na Transformação,” 2021. Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.secil-group.com/content/dam/secilInstitucional/documentos/pt/documentos/relatorios-de-sustentabilidade/Relat%C3%B3rio-Sustentabilidade_2021.pdf
- [3] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, “Sustainable development and climate change initiatives,” *Cem Concr Res*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.
- [4] S. Nie *et al.*, “Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application,” *J Clean Prod*, vol. 334, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130270.
- [5] K. K. Ummatin and Q. A. M. O. Arifianti, “Review and Analysis of Coal Substitution with Refuse Derived Fuel (RDF) in Cement Plant using System Dynamic.”
- [6] Cembureau, “Activity Report - Cembureau,” 2020. Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: <https://cembureau.eu/media/m2ugw54y/cembureau-2020-activity-report.pdf>
- [7] Global Cement and Concrete Association, “SECIL’s ‘Clean Cement Line Project.’” <https://gccassociation.org/concretefuture/secils-clean-cement-line-project/> (accessed Jun. 28, 2022).
- [8] C. Baur and D. Wee, “Manufacturing’s next act,” Jun. 2015.
- [9] Secil S.A., “Zero Fossil Fuel | Grupo Secil.” <https://www.secil-group.com/pt/inovacao/zero-fossil-fuel> (accessed Jun. 28, 2022).
- [10] N. Shehata *et al.*, “Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 163, pp. 558–573, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.05.052.
- [11] R. Sarc and K. E. Lorber, “Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs),” *Waste Management*, vol. 33, no. 9, pp. 1825–1834, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.004.
- [12] S. Gerassimidou, C. A. Velis, P. T. Williams, and D. Komilis, “Characterisation and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review,” *Waste Management and Research*, vol. 38, no. 9. SAGE Publications Ltd, pp. 942–965, Sep. 01, 2020. doi: 10.1177/0734242X20941085.

- [13] M. C. di Lonardo, M. Franzese, G. Costa, R. Gavasci, and F. Lombardi, “The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications,” *Waste Management*, vol. 47, pp. 195–205, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.018.
- [14] E. C. Rada and G. Andreottola, “RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU,” *Waste Management*, vol. 32, no. 6, pp. 1059–1060, Jun. 2012. doi: 10.1016/j.wasman.2012.02.017.
- [15] R. Ramos Casado *et al.*, “Classification and characterisation of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues,” *Waste Management*, vol. 47, pp. 206–216, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.05.018.
- [16] Recivalongo, “RDF Production Unit - Recivalongo.” <https://recivalongo.pt/en/solucao/unidade-de-producao-cdr> (accessed Jun. 14, 2022).
- [17] R. Sarc and K. E. Lorber, “Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs),” *Waste Management*, vol. 33, no. 9, pp. 1825–1834, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.004.
- [18] A. M. L. Násner *et al.*, “Refuse Derived Fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plusTM modelling: Thermodynamic and economic viability,” *Waste Management*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 187–201, Nov. 01, 2017. doi: 10.1016/j.wasman.2017.08.006.
- [19] L. R. Infiesta, C. R. N. Ferreira, A. G. Trovó, V. L. Borges, and S. R. Carvalho, “Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel,” *J Environ Manage*, vol. 236, pp. 715–719, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.02.017.
- [20] A. Hajinezhad, Z. Halimehjani, and M. Tahani, “Utilization of Refuse-Derived Fuel (RDF) from Urban Waste as an Alternative Fuel for Cement Factory: a Case Study,” 2016.
- [21] B. Reza, A. Soltani, R. Ruparathna, R. Sadiq, and K. Hewage, “Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 81, pp. 105–114, 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.10.009.
- [22] M. Nasrullah, P. Vainikka, J. Hannula, M. Hurme, and J. Kärki, “Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 1: SRF produced from commercial and industrial waste,” *Waste Management*, vol. 34, no. 8, pp. 1398–1407, 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2014.03.011.

- [23] M. Nasrullah, P. Vainikka, J. Hannula, and M. Hurme, “Elemental balance of SRF production process: Solid recovered fuel produced from commercial and industrial waste,” *Fuel*, vol. 145, pp. 1–11, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.12.071.
- [24] International Environment Technology Center, “Waste to Energy Considerations for Informed Decision-Making: Summary for Policymakers.” Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.unep.org/ietc/resources/publication/waste-energy-considerations-informed-decision-making>
- [25] Deltaway, “Waste-to-Energy: How It Works - Deltaway.” <https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/#tip4> (accessed Jun. 16, 2022).
- [26] M. Margarida Boavida *et al.*, “Catarina Pereira Nobre Thermochemical upgrading of Refuse Derived Fuel,” 2019.
- [27] S. Martins Dias, R. Barros Silva, F. Barreiro, and M. Costa, “Avaliação do Potencial de Produção e Utilização de CDR em Portugal Continental,” Jul. 2006.
- [28] A. Bosmans and L. Helsen, “Energy from Waste: Review of Thermochemical Technologies for Refuse Derived Fuel (RDF) Treatment,” 2010.
- [29] “Draft of a German Report with basic informations for a BREF - Document ‘Waste Incineration,’” Dec. 2001.
- [30] M. Costa, N. Massarotti, A. Mauro, F. Arpino, and V. Rocco, “CFD modelling of a RDF incineration plant,” *Appl Therm Eng*, vol. 101, pp. 710–719, May 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.073.
- [31] C. Dejtrakulwong and S. Patumsawad, “Four zones modeling of the downdraft biomass gasification process: Effects of moisture content and air to fuel ratio,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 142–149. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.064.
- [32] M. Materazzi, P. Lettieri, R. Taylor, and C. Chapman, “Performance analysis of RDF gasification in a two stage fluidized bed-plasma process,” *Waste Management*, vol. 47, pp. 256–266, 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.016.
- [33] J. Koornneef, M. Junginger, and A. Faaij, “Development of fluidized bed combustion- An overview of trends, performance and cost,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, no. 1. pp. 19–55, Feb. 2007. doi: 10.1016/j.pecs.2006.07.001.
- [34] H. Hettiarachchi, S. Ryu, S. Caucci, and R. Silva, “Municipal solid waste management in Latin America and the Caribbean: Issues and potential solutions from the governance perspective,” *Recycling*, vol. 3, no. 2, 2018, doi: 10.3390/recycling3020019.
- [35] M. Paolo and M. Paola, “RDF: From waste to resource - The Italian case,” in *Energy*

- Procedia*, Elsevier Ltd, Dec. 2015, pp. 569–584. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.136.
- [36] A. Garg, R. Smith, D. Hill, N. Simms, and S. Pollard, “Wastes as co-fuels: The policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications,” *Environmental Science and Technology*, vol. 41, no. 14. pp. 4868–4874, Jul. 15, 2007. doi: 10.1021/es062163e.
- [37] P. Berardi, M. F. Almeida, M. de L. Lopes, and J. Maia Dias, “Analysis of Portugal’s refuse derived fuel strategy, with particular focus on the northern region,” *J Clean Prod*, vol. 277, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123262.
- [38] Agência Portuguesa do Ambiente (APA), “Produção e gestão de resíduos urbanos | Relatório do Estado do Ambiente.” <https://rea.apambiente.pt/content/produ%C3%A7%C3%A3o-e-gest%C3%A3o-de-res%C3%ADduos-urbanos> (accessed Jun. 14, 2022).
- [39] “Global Refuse-Derived Fuel Market Forecast Report, 2021-2031.” <https://www.factmr.com/report/1461/refuse-derived-fuel-market> (accessed Jun. 15, 2022).
- [40] S. Mbt and M. Brown, “363 Refuse Derived Fuel-A European Market Heading for Overcapacity Refuse Derived Fuel-A European Market Heading for Overcapacity.”
- [41] F. English, B. De Caemel, M. Le Bihan, and F. Michel, “Use of SRF and RDF in Europe: Literature Review and Administrative Situations Encountered in the Field,” May 2018, Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: www.record-net.org
- [42] C. S. Psomopoulos, “Residue Derived Fuels as an Alternative Fuel for the Hellenic Power Generation Sector and their Potential for Emissions ReductionConstantinos S. Psomopoulos,” *AIMS Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 321–341, 2014, doi: 10.3934/energy.2014.3.321.
- [43] Y. Ding *et al.*, “A review of China’s municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 293. Elsevier Ltd, Apr. 15, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126144.
- [44] O. K. M. Ouda, S. A. Raza, A. S. Nizami, M. Rehan, R. Al-Waked, and N. E. Korres, “Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61. Elsevier Ltd, pp. 328–340, Aug. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.005.
- [45] A. S. Nizami *et al.*, “An argument for developing waste-to-energy technologies in Saudi Arabia,” *Chem Eng Trans*, vol. 45, pp. 337–342, Oct. 2015, doi: 10.3303/CET1545057.

- [46] Government of India - Department of Science & Technology, "Time Is | Technology Innovation Management & Entrepreneurship Information Service." <https://www.technopreneur.net/technology/new-technologies/energy/pyrolysis.html> (accessed Jun. 14, 2022).
- [47] M. Chakraborty, C. Sharma, J. Pandey, and P. K. Gupta, "Assessment of energy generation potentials of MSW in Delhi under different technological options," *Energy Convers Manag*, vol. 75, pp. 249–255, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.027.
- [48] S. Saini, P. Rao, and Y. Patil, "City Based Analysis of MSW to Energy Generation in India, Calculation of State-Wise Potential and Tariff Comparison with EU," *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 37, pp. 407–416, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.03.306.
- [49] I. Hulla Khan, "Open dumping of solid wastes in India Related papers Sust ainable Solid Waste Management in India Ranjit h Annepu Sust ainable Solid Waste Management in India Final-SELECT IVE PAGES FOR PRINT nimisha pandey Managing Solid Waste at t he Assembly Const it uency Level."
- [50] C. S. Psomopoulos, A. Bourka, and N. J. Themelis, "Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA," *Waste Management*, vol. 29, no. 5, pp. 1718–1724, May 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.11.020.
- [51] C. S. Psomopoulos, A. Bourka, and N. J. Themelis, "Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA," *Waste Management*, vol. 29, no. 5, pp. 1718–1724, May 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.11.020.
- [52] C. Mukherjee, J. Denney, E. G. Mbonimpa, J. Slagley, and R. Bhowmik, "A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119. Elsevier Ltd, Mar. 01, 2020. doi: 10.1016/j.rser.2019.109512.
- [53] United States Environment Protection Agency, "National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling | US EPA." <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials> (accessed Jun. 08, 2022).
- [54] E. Martínez Arce, D. Daza, P. Tello Espinoza, M. Soulier Faure, and H. Terraza, "Regional Evaluation on Urban Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean - 2010 Report," Jan. 2010. Accessed: Jun. 13, 2022. [Online]. Available: <https://publications.iadb.org/pt/relatorio-da-avaliacao-regional-da-gestao-de-residuos-solidos-urbanos-na-america-latina-e-caribe>
- [55] G. Genon and E. Brizio, "Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF," *Waste Management*, vol. 28, no. 11, pp. 2375–2385, Nov. 2008, doi:

- 10.1016/j.wasman.2007.10.022.
- [56] S. Hemidat, M. Saidan, S. Al-Zu'bi, M. Irshidat, A. Nassour, and M. Nelles, "Potential utilization of RDF as an alternative fuel to be used in cement industry in Jordan," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 20, Oct. 2019, doi: 10.3390/su11205819.
 - [57] K. Hitomi, "Automation-its concept and a short history," 1994.
 - [58] "Springer Handbook of Automation."
 - [59] S. Schmitz, M. Schluetter, and U. Epple, "Automation of automation - Definition, components and challenges," in *ETFA 2009 - 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2009. doi: 10.1109/ETFA.2009.5347197.
 - [60] J. Frohm, V. Lindström, M. Winroth, and J. Stahre, "The Industry's View on Automation in Manufacturing," 2006.
 - [61] J. Khandelwal and A. Sangwan, "Lean manufacturing implementation in an automated production line: a case study) 'Lean manufacturing implementation in an automated production line: a case study," 2013.
 - [62] S. Tissir, S. el Fezazi, and A. Cherrafi, "Industry 4.0 impact on Lean Manufacturing: Literature Review," in *2020 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020. doi: 10.1109/LOGISTIQUA49782.2020.9353889.
 - [63] E. V. Kumar, "New trends in Process Automation for the cement industry."
 - [64] A. K. Swain, "Material Mix Control Mining-+ in Cement Plant Automation."
 - [65] A. Kumar Udugu and A. Khare, "Automation of Cement Industries." [Online]. Available: www.ijreat.orgwww.ijreat.org
 - [66] D.R. Pongallu, P.H. Zope, and S.R. Suralkar, "Automation of Raw Material Transfer Process from Quarry to Silos in Cement Plant," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 2, no. 6, 2012.
 - [67] A. Samanta, "Process Automation of Cement Plant," *International Journal of Information Technology, Control and Automation*, vol. 2, no. 2, pp. 63–73, Apr. 2012, doi: 10.5121/ijitca.2012.2206.
 - [68] Hugh Jack, *Automating Manufacturing Systems with PLCs*, vol. 7.0. 2010.
 - [69] IEEE Industrial Electronics Society and Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation : ETFA 2012 : September 17-21, 2012, Kraków, Poland*.
 - [70] IEEE Staff and IEEE Staff, *2011 12th International Carpathian Control Conference*.

- [71] J. A. Rehg, “Structured PLC Programming with Sequential Function Charts.”
- [72] O. Pavlović and H. D. Ehrich, “Model checking PLC software written in function block diagram,” in *ICST 2010 - 3rd International Conference on Software Testing, Verification and Validation*, 2010, pp. 439–448. doi: 10.1109/ICST.2010.10.
- [73] S.A. Engineering College. Department of Computer Science and Engineering, S.A. Engineering College. Department of Electronics and Communication Engineering, S.A. Engineering College. Department of Electrical and Electronics Engineering, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES) : February 25th and 26th 2016*.
- [74] M. Wciřlik, K. Suchenia, and M. Łaskawski, “Programming of sequential control systems using functional block diagram language,” in *IFAC-PapersOnLine*, Jun. 2015, pp. 330–335. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.07.056.
- [75] Y. Liu and M. Lapata, “Learning Structured Text Representations”, doi: 10.1162/tacl_a_00005/1567596/tacl_a_00005.pdf.
- [76] L. B. Palma, J. A. Rosas, J. Pecorelli, and P. S. Gil, “Simulation of structured text language for PLC programming,” in *exp.at 2015 - 3rd Experiment International Conference: Online Experimentation*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2016, pp. 296–301. doi: 10.1109/EXPAT.2015.7463283.
- [77] L. B. Palma, J. A. Rosas, J. Pecorelli, and P. S. Gil, “Structured Text simulator for PLC in learning environment,” in *2015 International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, ITHET 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2015. doi: 10.1109/ITHET.2015.7218039.
- [78] S. Ould Biha, “A formal semantics of PLC programs in Coq,” in *Proceedings - International Computer Software and Applications Conference*, 2011, pp. 118–127. doi: 10.1109/COMPSAC.2011.23.
- [79] Kelvin T. Erickson, “The workhorse of factory automation keeps things on track,” 1996.
- [80] M. G. Hudedmani, R. M. Umayal, S. K. Kabberalli, and R. Hittalamani, “Programmable Logic Controller (PLC) in Automation,” *Advanced Journal of Graduate Research*, vol. 2, no. 1, pp. 37–45, May 2017, doi: 10.21467/ajgr.2.1.37-45.
- [81] A. Falcione and B. H. Krogh, “Design Recovery for Relay Ladder Logic.”
- [82] J. A. Ferreira, J. L. Azevedo, and J. P. Estima De Oliveira, “OBJECT ORIENTED SIMULATION OF RELAY LADDER LOGIC.”
- [83] A. Kumar and S. R. Samadder, “Development of lower heating value prediction models and estimation of energy recovery potential of municipal solid waste and RDF

- incineration,” *Energy*, vol. 274, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127273.
- [84] G. Ayas and H. F. Oztop, “Thermal Analysis Of Different Refuse Derived Fuels Samples,” *Thermal Science*, vol. 26, no. 6 Part A, pp. 4395–4406, 2021, doi: 10.2298/TSCI201010249A.
- [85] S. Gerassimidou, C. A. Velis, P. T. Williams, M. J. Castaldi, L. Black, and D. Komilis, “Chlorine in waste-derived solid recovered fuel (SRF), co-combusted in cement kilns: A systematic review of sources, reactions, fate and implications,” *Crit Rev Environ Sci Technol*, vol. 51, no. 2, pp. 140–186, 2021, doi: 10.1080/10643389.2020.1717298.
- [86] Martin Ševčík, “Near-Infrared Spectroscopy for Refuse Derived Fuel Characterization,” 2019.
- [87] M. Ghobakhloo, “Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, Elsevier Ltd, Apr. 10, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119869.
- [88] T. Lins, R. A. R. Oliveira, L. H. A. Correia, and J. S. Silva, “Industry 4.0 Retrofitting,” in *Brazilian Symposium on Computing System Engineering, SBESC*, IEEE Computer Society, Jul. 2018, pp. 8–15. doi: 10.1109/SBESC.2018.00011.
- [89] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, “Industry 4.0,” *Business and Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, Aug. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [90] T. L. Olsen and B. Tomlin, “Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management,” *Manufacturing and Service Operations Management*, vol. 22, no. 1, pp. 113–122, 2020, doi: 10.1287/msom.2019.0796.
- [91] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, “The internet of things: a survey,” *Information Systems Frontiers*, vol. 17, no. 2, pp. 243–259, Apr. 2015, doi: 10.1007/s10796-014-9492-7.
- [92] K. Sachs, I. Petrov, and P. Guerrero, “From the Internet of Computers to the Internet of Things,” 2010.
- [93] Y. K. Chen, “Challenges and opportunities of internet of things,” in *Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC*, 2012, pp. 383–388. doi: 10.1109/ASPDAC.2012.6164978.
- [94] F. Wortmann and K. Flüchter, “Internet of Things: Technology and Value Added,” *Business and Information Systems Engineering*, vol. 57, no. 3, Gabler Verlag, pp. 221–224, Jun. 01, 2015. doi: 10.1007/s12599-015-0383-3.
- [95] Thyssenkrupp Polysius, “Cement Products | Thyssenkrupp Polysius.” <https://www.thyssenkrupp-polysius.com/en/products> (accessed Jun. 05, 2023).

- [96] Thyssenkrupp Polysius, “Prepol® SC – Step Combustor For Waste Utilization in Cement Plants.” <https://www.thyssenkrupp-polysius.com/en/green-technologies/fuel-substitution/prepol> (accessed Jun. 05, 2023).

Anexo I



Figura A.1 - Hangar O4 utilizado para armazenar CDRs na Secil e transportador de lâminas de transporte de CDRs ao topo do hangar.



Figura A.2 - Boxes de Armazenamento de CDRs no interior do Hangar O4.



Figura A.3 - Grade no interior da boxe de armazenamento de CDRs do Hangar O4



Figura A.4 - Transportador de arrasto de abastecimento das boxes pelo topo, e guilhotinas pneumáticas de seleção de boxe a abastecer.



Figura A.5 - Traseira das unidades de descarga de CDRs e transportador de tela de recepção.