FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Projecto e construção de um piloto de destilação contínua

Estudo da sua manutibilidade

Ana Sofia de Oliveira Figueiredo

Licenciada em Engenharia Química – Ramo Ambiente e Qualidade pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Tese submetida com vista à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Manutenção Industrial sob a supervisão do Professor Doutor Luís Andrade Ferreira e do Professor Doutor João Miguel Alves da Silva

Porto, Julho de 2008

Ao meus Pais e Irmãos

Ao Paulo

À Rafaela

AGRADECIMENTOS

A todos os que tornaram possível a realização desta tese.

Aos Professores Luís Andrade Ferreira e João Miguel Silva por me terem orientado durante a realização deste trabalho.

Aos colegas do ISEL por todo o apoio e incentivo manifestado ao longo de todo o Mestrado.

Aos professores da parte curricular do Mestrado, por toda a atenção e disponibilidade que sempre demonstraram.

Aos colegas do Mestrado por me terem recebido de forma tão atenciosa, e pela camaradagem que se estabeleceu ao longo deste curso.

Ao ISEL/DEQ por ter proporcionado a realização deste trabalho no Laboratório de Tecnologia Química do ISEL.

Aos meus Pais e irmãos, pelo apoio familiar e carinho sempre manifestado. Ao Paulo pelo apoio, incentivo e carinho sempre demonstrado, desde o início do Mestrado.

A todos os meus Agradecimentos!

RESUMO

As colunas de destilação são dos equipamentos mais utilizados na indústria para a realização de processos de separação. Perturbações durante o seu funcionamento, como a avaria de componentes podem resultar num desvio ao normal funcionamento da instalação. Um estudo desenvolvido por *Kister*[1] (2003) mostra que o número de avarias em colunas de destilação não está a diminuir, mas sim a aumentar.

O objectivo do presente trabalho, foi desenvolver uma análise de falhas e seus efeitos (FMEA) a uma coluna de destilação contínua piloto do Laboratório de Tecnologia Química do ISEL. A instalação completa é constituída pela coluna de destilação, pela unidade de aquisição e controlo (UAC) e pela estrutura de suporte. A instalação tem uma altura de 3,7 m; 1,0 m de largura na base; 0,5 m de largura no topo e 0,5 m de profundidade. Na sua totalidade a instalação é constituída por 326 componentes de diversos materiais: vidro *Duran*®/Borosilicato3.3; liga de aluminínio-silício, aço inoxidável; *Teflon;* plástico e Quartzo.

Da análise FMEA desenvolvida, identificou-se:

- 726 modos de falha que originaram 942 efeitos dos modos de falha;
- Que 88,4% dos modos de falha identificados possuem uma probabilidade de ocorrência "Muito Improvável;
- Os subsistemas ebulição e estrutura possuem a maioria dos modos de falha do equipamento, cerca de 59% (subsistema ebulição 35%, subsistema estrutura 24%);
- Que 43% dos efeitos dos modos de falha possuem uma severidade "Muito Crítico", 34,3% "Crítico" e 22,3% "Pouco Crítico";
- Que no subsistema estrutura e no subsistema unidade de aquisição e controlo o grau de severidade predominante é o mais severo, com 98,2% e 66,7% respectivamente;
- Que na instalação existem 14% de modos de falha críticos e que destes 4,6% localizam-se no subsistema ebulição e 4,5% no subsistema unidade de aquisição e controlo.

Como continuação deste trabalho, seria interessante a monitorização das falhas ocorridas nesta instalação e a optimização da base de dados desenvolvida, de forma a facilitar a introdução de registos de falhas ou acções de manutenção correctivas ou preventivas, para validar futuramente a análise de sensibilidade que serviu de base para a atribuição dos modos de falhas e seus efeitos a cada componente, assim como os índices de probabilidade de ocorrência e severidade atribuídos a cada modo de falha.

[1] Kister, H.Z.(2003). What caused tower malfunctions in the last 50 years? Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, 81, pp.5-26.

PÁGINA EM BRANCO

ABSTRACT

Distillation columns are the most widely used separation operation in the process industry. Disturbances during operation such as the failures of individual components can result in a deviation from the normal operation. A study carried out by *Kister*[2] (2003) showed that safety related incidences do occur in distillation columns and have in fact increased in recent years.

The purpose of the present work, was to develop a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of a continuous distillation column of the Laboratory of Chemical Technology of the ISEL. The complete installation is constituted by the distillation column, the unit of acquisition and control (UAC) and by the structure of support. The installation has a height of 3,7 m; 1,0 m of width in the base; 0,5 m of width in top and 0,5 m depth. In its totality the installation is constituted by 326 components of diverse materials: Duran®/Borosilicato3.3 glass; league of alumininiun-silicon, stainless steel; Teflon; plastic and Quartz. In the FMEA developed, it was identified:

• 726 failure modes that had originated 942 effect of the failure modes;

• That 88,4% in the identified failure modes have a probability of "Very Improbable" occurrence;

• The subsystems Boiling and Structure have the majority of the failure modes of the equipment, about 59% (subsystem boiling 35%, subsystem structure 24%);

• That 43% of the effect of the failure modes have "Very Critical" severity, 34,3% "Critic" and "Less Critical" 22,3%;

• That in the subsystem structure and the subsystem unit of acquisition and control the predominant degree of severity is the most severe, with 98,2% and 66,7% respectively;

• That in the installation 14% of the failure modes are critical and that of these 4.6% be situated in the subsystem boiling and 4,5% in the subsystem unit of acquisition and control.

As continuation of this work, the monitoring of the occurred failure in this installation would be interesting and the optimization of the database developed, of form to facilitate the introduction of registers of failures imperfections or shares of corrective or preventive maintenance, to future validate the sensitivity analysis that served of base for the attribution in the failure modes and its effect to each component, as well as the rating of occurrence and severity attributed to each way of fails.

[2] Kister, H.Z.(2003). What caused tower malfunctions in the last 50 years? Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, 81, pp.5-26.

PÁGINA EM BRANCO

ÍNDICE

Resumo i
Abstract iii
Índice v
Índice de quadros viii
Índice de figuras x
Índice de equações xi
Lista de símbolos e abreviaturas xiii

CAPÍTULO 1 - Evolução dos conceitos de manutenção 1

1.1 - Definição de manutenção 3

1.2 – Evolução da manutenção 5

1.2.1 – Objectivos da manutenção e da engenharia da manutenção.....6

1.2.2 – A manutenção em números 7

1.2.3 – Engenharia da manutenção no século XXI.....7

1.3 – Tipos de manutenção 9

1.3.1 – Manutenção correctiva.....10

1.3.2 – Manutenção preventiva.....11

1.3.3 – Manutenção oportunística.....11

1.3.4 – Manutenção condicionada 11

1.3.5 – Manutenção preditiva 12

1.4 – Filosofias de Gestão da Manutenção 12

1.4.1 – Manutenção centrada na fiabilidade (RCM).....12

1.4.2 – Manutenção produtiva total (TPM) 13

1.4.3 – Actividade centrada na fiabilidade 16

1.4.4 – Inspecção baseada no risco (RBI).....16

1.5 – Planeamento da manutenção 17

1.6 – Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade 19

1.7 – Avarias 22

CAPÍTULO 2 – Análise dos modos de falha e seus efeitos 25

2.1 – Introdução 27

2.2 – Termos e definições 28

2.3 – Tipos de FMEA 29

2.3.1 – FMEA do projecto 29

2.3.2 – FMEA do processo 30

2.3.3 – FMEA de componentes 32

2.4 – Desenvolvimento de uma análise FMEA 32

2.4.1 – Definição do sistema e dos requisitos necessários 37

2.4.2 – Estabelecimento de princípios básicos 38

2.4.3 – Descrição do sistema e dos blocos funcionais associados 38

2.4.4 – Identificação dos modos de falha e seus efeitos associados 38

2.4.5 – Preparação de uma listagem de componentes 39

2.5 – Avaliação de criticidade 40

2.5.1 – Técnica RPN 40

2.5.2 – Normas militares (MIL-STD-1629) 43

2.6 – Críticas à análise FMEA 48

2.7 – Adaptação da metodologia FMEA ao trabalho desenvolvido 50

CAPÍTULO 3 – Introdução à operação unitária destilação 53

3.1 – Definição de destilação 55

3.2 – Classificação de colunas de destilação 56

3.3 – Equipamento básico de destilação 57

3.3.1 – Colunas de pratos.....57

3.3.2 – Colunas de enchimento.....58

3.4 – Terminologia.....60

3.5 – Princípios de destilação 61

3.5.1 – Pressão de vapor e ponto de ebulição 61

3.5.2 – Volatilidade relativa.....61

3.5.3 – Equilíbrio líquido-vapor 62

3.6 – Projecto de colunas de destilação 65

3.6.1 – Método *McCabe-Thiele* 65

3.6.2 – Método *Ponchon-Savarit*.....66

3.7 – Simulação de colunas de destilação.....66

3.8 – Factores que afectam o desempenho de colunas de destilação.....68

3.8.1 – Condições de alimentação 68

3.8.2 – Condições de refluxo 69

3.8.3 – Condições internas do fluxo de líquido e vapor.....70

3.8.4 – Estado dos pratos ou enchimento.....72

3.8.5 – Condições ambientais 72

3.9 – Causas de mau funcionamento de colunas de destilação.....73

3.10 – Estratégia para a resolução de problemas em colunas de destilação 76

3.11 – Simulação de falhas em colunas de destilação.....85

CAPÍTULO 4 – Descrição da unidade piloto e aplicação de uma análise FMEA.....89

4.1 – Descrição do equipamento.....91

4.2 – Definição dos requisitos básicos.....93

4.3 – Estabelecimento dos princípios básicos.....94

4.4 – Descrição do sistema e dos blocos funcionais associados 97

4.4.1 – Subsistema ebulição 98

4.4.2 – Subsistema esgotamento 106

4.4.3 – Subsistema alimentação 109

4.4.4 – Subsistema rectificação 112

4.4.5 – Subsistema condensação 115

4.4.6 – Subsistema estrutura 118

4.4.7 – Subsistema unidade de aquisição e controlo 120

4.5 – Análise FMEA 127

CAPÍTULO 5 – Conclusões 147

BIBLIOGRAFIA 151

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Evolução dos conceitos de manutenção 8

Quadro 2.1 – Factores relevantes da análise FMEA 34

Quadro 2.2 – Processo FMEA tradicional 35

Quadro 2.3 – Possibilidade de ocorrência de uma falha 36

Quadro 2.4 – Possibilidade da falha chegar ao cliente 36

Quadro 2.5 – Severidade da falha 37

Quadro 2.6 – *Layout* típico de uma análise FMEA tradicional 39

Quadro 2.7 – Lista típica de componentes críticos 39

Quadro 2.8 – Possível interpretação dos valores de RPN 40

Quadro 2.9 – Exemplo dos índices de probabilidade de detecção 41

Quadro 2.10 – Exemplo dos índices de probabilidade de ocorrência 42

Quadro 2.11 – Exemplo dos índices de severidade 42

Quadro 2.12 – Exemplo do índice de severidade para a MIL-STD-1629.....43

Quadro 2.13 – Níveis de probabilidade de ocorrência (MIL-STD-1626).....44

Quadro 2.14 – Probabilidade do efeito da falha.....46

Quadro 2.15 – FMEA modificado por *Ben-Daya* e *Raouf*.....49

Quadro 2.16 – Probabilidade de ocorrência de falha 50

Quadro 2.17 – Grau de severidade.....50

Quadro 2.18 – Probabilidade de ocorrência de falha, adaptado.....50

Quadro 2.19 – Grau de severidade, adaptado 51

Quadro 2.20 – Quadro de criticidade 51

Quadro 3.1 – Causas de mau funcionamento em colunas de destilação registado entre 1950-1990 e 1990-1997 73

Quadro 3.2 - Causas de mau funcionamento de colunas de destilação.....74

Quadro 3.3- Problemas mais comuns em colunas de destilação, *Kister* (2003) 80

Quadro 4.1 – Legenda da figura 4.6.....99

Quadro 4.2 – Legenda da figura 4.8.....107

Quadro 4.3 – Legenda da figura 4.10.....110

Quadro 4.4 – Legenda da figura 4.12.....112

Quadro 4.5 – Legenda da figura 4.14.....116

Quadro 4.6 – Legenda da figura 4.16.....118

Quadro 4.7 – Componentes da unidade de aquisição e controlo (UAC) 120

Quadro 4.8 – Módulo *Field Point* FP-DO-400 122

Quadro 4.9 – Módulo *Field Point* FP-TB-10/2.....124

Quadro 4.10 – Módulo *Field Point* FP-TB-10/1.....125

Quadro 4.11 – Módulo *Field Point* FP-TC-120.....126

Quadro 4.12 – Modos de falha críticos 129

Quadro 4.13 – Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência142

Quadro 4.14 – Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência e subsistema..... 142

Quadro 4.15 – Distribuição dos efeitos dos modos de falha por grau de severidade..... 143

Quadro 4.16 – Distribuição dos efeitos dos modos de falha por grau de severidade e subsistema 144

Quadro 4.17 – Distribuição dos modos de falha críticos por subsistema..... 145

Quadro 5.1 – Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência. 149

Quadro 5.2 – Distribuição dos efeitos dos modos de falha por grau de severidade..... 149

Quadro 5.3 – Distribuição dos modos de falha crítico por subsistema 150

ÍNDICE DE FÍGURAS

Figura 1.1 – Diferentes tipos de manutenção..... 9

Figura 1.2 – Abordagem BCM; Maximização de lucros 16

Figura 1.3 – Curva da banheira..... 20

Figura 1.4 – Exemplo de uma carta de controlo 23

Figura 2.1 – Procedimento geral da metodologia FMEA 33

Figura 2.2 – Matriz de criticidade..... 48

Figura 3.1 – Exemplo de um diagrama de equilíbrio..... 62

Figura 3.2 – Exemplo de uma curva de equilíbrio líquido-vapor 64

Figura 3.3 – Exemplo de sistemas não-ideais 64

Figura 4.1 – Coluna de destilação dividida em subsistemas funcionais..... 91

Figura 4.2 – Diagrama temperatura/composição 95

Figura 4.3 – Diagrama de fases..... 95

Figura 4.4 – Diagrama temperatura/composição de um azeótropo com ponto de ebulição mínimo 96

Figura 4.5 – Diagrama temperatura/composição de um azeótropo com ponto de ebulição máximo 96

Figura 4.6 – Representação esquemática do subsistema ebulição 99

Figura 4.7 – Diagrama de blocos do subsistema ebulição 105

Figura 4.8 - Representação esquemática do subsistema esgotamento 106

Figura 4.9 – Diagrama de blocos do subsistema esgotamento.....108

Figura 4.10 - Representação esquemática do subsistema alimentação 109

Figura 4.11 – Diagrama de blocos do subsistema alimentação.....111

Figura 4.12 - Representação esquemática do subsistema rectificação.....112

Figura 4.13 – Diagrama de blocos do subsistema rectificação 114

Figura 4.14 - Representação esquemática do subsistema condensação 115

Figura 4.15 – Diagrama de blocos do subsistema condensação 117

Figura 4.16 - Representação esquemática do subsistema estrutura 119

Figura 4.17 - Representação esquemática do módulo *Field Point* FP-DO-400.....123

Figura 4.18 - Representação esquemática do módulo *Field Point* FP-TB-10/2 125

Figura 4.19 - Representação esquemática do módulo *Field Point* FP-TB-10/1 125

Figura 4.20 - Representação esquemática do módulo *Field Point* FP-TC-120 126

Figura 4.21 - Representação esquemática geral da unidade de aquisição e controlo.....127

Figura 4.22 - Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência e subsistema 143

Figura 4.23 - Distribuição dos modos de falha por grau de severidade e subsistema.....144

Figura 4.24 - Distribuição dos modos de falha críticos por subsistema.....145

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Eq. 2.1 – Risco número prioritário.....40

Eq. 2.2 – Número crítico do modo de falha 46

Eq. 2.3 – Número crítico do item 47

Eq. 3.1 – Volatilidade relativa 62

Eq. 4.1 – Tendência de vaporização 96

Eq. 4.2 – Volatilidade relativa 97

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Adpt – Adaptador de tubagem com rosca

AdptCol – Adaptador de coluna

AFNOR – Associação francesa de normalização

AHP – *Analytical hierarchy process*

ALM – Unidade de alimentação

An – Anel roscado

BB – Bomba peristáltica

BCM – *Business centered maintenance*

Brr0.5 – Barra metálica de 0,5m

Brr0.7 – Barra metálica de 0,7m

Brr1 – Barra metálica de 1m

BrrD0.5x0.7 – Barra metálica diagonal de 0,5x0,7m

BrrD0.5x1 – Barra metálica diagonal de 0,5x1m

BrrD0.7x1 – Barra metálica diagonal de 0,7x1m

BrrFL50 – Barras de suporte para ligações KF

Bs – Base de suporte

C – Conector de vidro

CA – Análise de criticidade

$Caps_S$ – Cápsula do solenóide

C_m – Número crítico do modo de falha

Col – Coluna de vidro

Conds – Condensador

C_R – Número crítico do item

Ctc – Contactor

Ctr – Controlador

D – Probabilidade de detecção de falha

Dsj – Disjuntor

EB – Ebulidor

EEM – *Early equipment management*

Esf – Esferas roscadas

F_{15} – Flange KF15

F_{25} – Flange KF25

F_{50} – Flange KF50

FA12V – Fonte de alimentação de 12V

FA24V – Fonte de alimentação de 24V

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis* (Análise dos modos de falha e seus efeitos)

FMECA – *Failure mode effect and criticality analysis*

FP2000 – Módulo *Field Point* 2000

FP-AI-V5 – Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V

FP-AO-C420 – Módulo de saída analógica de 2 canais 4-20mA

FP-AO-V10 – Módulo de saída analógica de 2 canais 0-10V

FP-AO-V5B – Módulo de saída analógica de 2 canais 0-5V

FP-DI-DC – Módulo de entrada discreta com 2 canais 3-32VDC

FP-DO-40 – Módulo *Field Point* DO-400

FP-TB-10/1 – Módulo *Field Point* TB-10

FP-TB-10/2 – Módulo *Field Point* TB-10

FP-TC-120 – Módulo *Field Point* TC-120

FP-TC-K – Módulo de entrada de 2 canais de termopares K

FTA – *Fault tree analysis*

G – Garra metálica

HAZOP – *Hazards and Operability Analysis*

Int – Interruptor

j – último modo de falha do item

k_i – Tendência de vaporização do componente i

MC – Manutenção correctiva

MP – Manutenção preventiva

MTBF – *Mean time between failure*

MTTR – *Mean time to repair*

n – modo de falha de um item

N – Noz metálica

O – Probabilidade de ocorrência de um modo de falha

OEE – *Overall equipment management*

OR_{15} – *O'ring* KF15

OR_{15PTFE} – *O'ring* KF15 de *Teflon*

OR_{25} – *O'ring* KF25

OR_{25PTFE} – *O'ring* KF25 de *Teflon*

OR_{50} – *O'ring* KF50

OR_{50PTFE} – *O'ring* KF50 de *Teflon*

P – Módulo de enchimento estruturado *Sulzer* 1900

P_{ABS} – Pressão absoluta

P_{Dif} – Sensor de pressão diferencial

P_{Met} – Pinça metálica

Q – Medidor de caudal

QE – Quadro eléctrico

$R_{1,2,3}$ – Resistências de aquecimento

RAM – *Risk assessment & management*

RCM – *Reliability centered maintenance*

RL – Relé

RLS – Relé de estado sólido

RPN – *Risk priority number*

S – Severidade (1 a 10)

S – Solenóide

S_d - Probabilidade de não detecção de falha (1 a 10)

S_f – Probabilidade de ocorrência de falha (1 a 10)

T – Termopar

t -Tempo de funcionamento

T_A – Tanque da alimentação

T_{Ang} – Tubo angular

Tb_{PVC} – Tubagem em PVC (Policloreto de vinilo)

Tb_S – Tubagem de silicone

TC-ALM – Termopar duplo da alimentação

TC-EB – Termopar duplo do ebulidor

TCg – Tubo de carga

T_D – Tanque do destilado

Tmp_{AB} – Tampa roscada com abertura no topo

TP_{Dif}- Conds-2 – Toma de pressão diferencial no topo da coluna

TP_{Dif}- T_{Ang} – Toma de pressão diferencial no tubo angular

TP_{Dif}-EB – Toma dupla de pressão diferencial no ebulidor

TPM – *Total productive maintenance*

T_R – Tanque do resíduo

UAC – Unidade de aquisição e controlo

V – Válvula de vidro

VC – Válvula de controlo proporcional

VD – Válvula de descarga

VE – Válvula de esgotamento

VG – Válvula de globo

V_{JG} – Válvula *Jonh Guest*

VS – Válvula do solenóide

x_i - Fracção molar do componente i na fase líquida

yi – Fracção molar do componente i na fase vapor

α - Razão do modo de falha

$\alpha_{i,j}$ – Volatilidade relativa do componente i em relação ao componente j

β - Probabilidade do efeito de falha

λ_p – Taxa de falha de um item

CAPÍTULO 1

Evolução dos conceitos associados à manutenção

PÁGINA EM BRANCO

No capítulo 1 pretende enumerar-se os vários tipos e filosofias de manutenção, assim como apresentar a evolução do conceito de manutenção ao longo do tempo.

1.1 - Definição de Manutenção

De forma a atingir os desempenhos alcançados pelas grandes empresas mundiais, muitas empresas desenvolvem esforços para melhorar a qualidade, a produtividade e reduzir os custos. Para muitas empresas, parte deste esforço inclui uma análise das acções de manutenção.

Tradicionalmente, muitas companhias utilizam uma estratégia de manutenção correctiva, fazendo reparações ao equipamento, apenas quando este se avaria. Mais recentemente, com o desenvolvimento da tecnologia e o aumento da sofisticação dos colaboradores da manutenção levou a que algumas empresas substituíssem esta abordagem reactiva, por uma estratégia de manutenção proactiva utilizando actividades de manutenção preventiva e preditiva que previnem a ocorrência de falhas no equipamento. Segundo a AFNOR, a manutenção é um conjunto de acções que permitem manter ou restabelecer um bem num estado específico ou com possibilidade de assegurar um determinado serviço.

Pintelon (1999) define o conceito de manutenção como sendo o conjunto de várias intervenções de manutenção (correctiva, preventiva, condicionada) e da estrutura geral em que estas intervenções estão previstas. O conceito de manutenção constitui a base, a partir da qual as intervenções específicas de manutenção são desenvolvidas e traduz o modo como a empresa pensa relativamente ao papel da manutenção como uma função operacional.

Devem ser considerados os factores que descrevem tecnicamente cada sistema alvo de manutenção, assim como factores de interligação entre diferentes sistemas e os factores que descrevem a estrutura da organização. Se alguns dos aspectos necessários não forem considerados, o conceito de manutenção poderá não atingir em plenitude os objectivos esperados, logo o conceito de manutenção deve ser muito claro.

Devido aos custos, directos e indirectos, envolvidos, e devido ao impacto operacional que a manutenção pode ter no rendimento dos equipamentos, o desenvolvimento do conceito de manutenção deve ser feito de uma forma estruturada. Além disso, o conceito de manutenção, deve ser personalizado, ou seja, deve considerar todos os factores relevantes relativamente à situação concreta. Assim como, deve responder às necessidades da empresa, o que significa que cada empresa terá o seu próprio conceito de manutenção. Outra questão importante, é que, visto os sistemas industriais evoluírem rapidamente devido ao desenvolvimento e à inovação tecnológica, o conceito de manutenção também tem que ter em consideração as alterações dos

sistemas, o que leva a que este conceito além de ter que ser estruturado, também tem que ser flexível, permitindo o seu aperfeiçoamento.

Waeyenbergh e *Pintelon* (2002), propõem uma base para o desenvolvimento do conceito de manutenção que deixa alguma liberdade para a sua personalização. A estrutura proposta, tem em consideração a informação computorizada e o conhecimento adquirido pela experiência, o que é um ponto importante pois, antes da introdução de um Sistema de Informação de Gestão da Manutenção, a informação encontra-se no papel ou na "cabeça das pessoas". Adquirir o conhecimento proveniente da experiência dos operadores, por vezes consome muito tempo e traz algumas dificuldades introduzindo um grau de risco elevado no caso de perda deste tipo de informação, que é extremamente útil.

No desenvolvimento de um plano de manutenção, os dados são os requisitos mais importantes e a sua recolha é a parte mais difícil do trabalho. Independentemente do conceito de manutenção, em que o plano se baseie, e independentemente da quantidade de dados necessários, os dados são sempre indispensáveis. Deve ser feita uma distinção entre o 1º nível de dados e o 2º nível de dados. *Waeyenbergh* e *Pintelon* (2002), definem como 1º nível de dados, os dados registados na fase de instalação do sistema, e o 2º nível de dados, os dados recolhidos durante o normal funcionamento da instalação, estes autores consideram ser mais fácil obter o 1º nível de dados, por parte dos fornecedores da instalação, do que o 2º nível de dados que se encontra na "cabeça das pessoas" ou guardado informaticamente, estes dados são provenientes do conhecimento e da experiência.

As empresas exploram dois tipos de conhecimento, o conhecimento explícito e o conhecimento implícito. O conhecimento explícito, está relacionado com os relatórios manuscritos ou em suporte informático. O conhecimento implícito, está relacionado com os trabalhadores e com a sua experiência, perícia e sensibilidade.

O problema com os dados, está relacionado com a recolha, a análise e a sua estruturação, especialmente quando não existe uma base de dados. Quando o trabalho não é feito da melhor forma, ou fica incompleto, corre-se o risco de perder alguma informação. Além de que, a recolha de dados pode sofrer atrasos sendo necessário um considerável investimento em tempo e trabalho. Esta é uma das razões, pela qual a maioria dos conceitos de manutenção são difíceis de implementar ao nível geral das empresas, especialmente quando as instalações estão dispersas geograficamente e possuem tecnologias diferentes.

1.2 – Evolução da Manutenção

Nos últimos anos, a segurança tornou-se numa questão cada vez mais importante no projecto e funcionamento de uma instalação industrial, devido a:

- Processos mais complexos;
- Estratégias de controlo sofisticadas;
- Processos altamente integrados que aumentam a dificuldade de funcionamento;
- Ocorrência de acidentes que resultam em perdas humanas, perdas financeiras e problemas ambientais.

A segurança de uma instalação industrial pode ser melhorada quer ao nível de projecto, quer ao nível operacional.

A produção engloba actividades que mantêm o funcionamento da instalação, a produção propriamente dita, a monitorização, o controlo, a simulação, a optimização, o arranque e a paragem da instalação.

As actividades de manutenção mantêm a instalação sob condições normais de funcionamento, contribuindo para a garantia de segurança e dos requisitos de qualidade preestabelecidos. Estas actividades incluem a inspecção, avaliação, desenvolvimento do plano de manutenção, limpeza, lubrificação, reparação e substituição.

Muitas empresas encaram a manutenção como uma inevitável fonte de custos. Para estas empresas as operações de manutenção têm uma função correctiva sendo executadas, apenas, em casos de emergência. Nos dias de hoje, esta forma de intervenção não é aceitável, devido à criticidade de certos aspectos, como por exemplo a qualidade dos produtos, a segurança e o aumento dos custos do departamento de manutenção, que podem representar entre 15 a 70% dos custos totais de produção.

Desde a revolução industrial, que a manutenção de equipamentos industriais tem-se mostrado um grande desafio, apesar dos progressos verificados, devido a factores como o tamanho dos equipamentos, os custos associados, a complexidade e a competição existente.

Actualmente, as acções de manutenção são conduzidas pelas leis de mercado, em particular para a indústria produtiva[3], a indústria de processos[4] e a indústria de matérias-primas[5]. Um incidente relacionado com um plano de manutenção ineficaz pode ter implicações a vários níveis, nomeadamente, rendimento, ambientais e segurança. Logo, há a necessidade efectiva de garantir a existência de procedimentos de gestão e manutenção que influenciem positivamente factores críticos como por exemplo a segurança, a qualidade dos produtos, a velocidade de inovação, o preço, os lucros e as garantias de fornecimento.

1.2.1 - Objectivos da Manutenção e da Engenharia da Manutenção

Apesar da Manutenção e da Engenharia da Manutenção terem o mesmo objectivo, disponibilidade do equipamento ao mínimo custo possível, o ambiente em que estes conceitos são aplicados diferem significativamente. Concretizando, a Engenharia da Manutenção é uma função analítica, deliberativa e metódica. Por outro lado, a Manutenção é uma função que normalmente é desempenhada em condições adversas e sob *stress*, e o seu objectivo principal é repor a operacionalidade do equipamento utilizando os recursos disponíveis.

Os termos "Manutenção" e "Engenharia de Manutenção" podem ter significados diferentes consoante o contexto. Por exemplo, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos, encara a Engenharia de Manutenção como uma ferramenta que ajuda na fase de aquisição dos recursos necessários às acções de manutenção e estabelece as políticas e os planos para a utilização dos recursos no desenvolvimento ou acompanhamento de acções de manutenção. Por outro lado, as acções de manutenção são vistas como actividades que desenvolvem tarefas, acções físicas nos equipamentos como por exemplo, realização de testes, reparações, calibrações, alterações e inspecção.

A contribuição da Engenharia da Manutenção inclui a melhoria, diminuição do número e da frequência das tarefas de manutenção, diminuição da sua complexidade, estabelecimento da frequência óptima e do âmbito das acções de manutenção preventiva, melhoria e garantia da máxima utilização das ferramentas de manutenção disponíveis e melhoria da organização da manutenção.

---

[3] Indústria Produtiva é o tipo de indústria que transforma a matéria-prima em produto comercial pronto a ser consumido ou usado.

[4] Indústrias de Processos são indústrias que, através de processos físicos e químicos, transformam matérias-primas de baixo valor agregado em produtos com um valor agregado maior, como bens de consumo e produtos intermediários.

[5] Indústria de matérias-primas trabalha com matéria-prima bruta transformando-a em matéria-prima para outras indústrias

1.2.2 - A Manutenção em números

Segundo *Dhillon* (2002) anualmente são gastos aproximadamente 300 biliões de dólares na manutenção de instalações pela indústria Norte Americana, e estima-se que, aproximadamente 80% desta quantia se destina à correcção de falhas crónicas de máquinas, sistemas e pessoas. A verba para manutenção do Departamento de Defesa Norte-americano em 1997 foi aproximadamente 79 biliões de dólares.

Em 1968, estimou-se que a implementação de melhorias nas práticas de manutenção no Reino Unido, permitiram poupar aproximadamente 300 milhões de Libras, em perdas de produção devido à indisponibilidade de equipamento. Em 1970, o ministério Britânico da Tecnologia estimou que o Reino Unido gastou aproximadamente 3000 milhões de libras por ano em manutenção.

A equipa de trabalho do departamento de manutenção numa indústria varia entre os 5 a 10% do número total de trabalhadores. Em 1969 havia em média 1 trabalhador da manutenção para 17, e em 1981 havia 1 trabalhador da manutenção para 12.

1.2.3 - Engenharia da Manutenção no Século XXI

Devido a vários factores, no século passado demonstrou-se que a manutenção deve ser considerada como parte integrante da estratégia empresarial, de forma a permitir o sucesso da organização. É expectável que os equipamentos deste século sejam mais computadorizados e fiáveis, tornando-se por outro lado, mais complexos. Além disso, a computorização do equipamento irá aumentar significativamente a importância da manutenção do *software*, aproximando-se da manutenção do *hardware*. Durante este século, será dada mais ênfase à manutenção com respeito à qualidade, segurança, custos efectivos e ao factor humano.

Desde o tempo em que existem estruturas de engenharia e sistemas mecânicos, que existe manutenção, incerteza associada à fiabilidade e avarias. Contudo, o impacto proveniente destas ocorrências tem sofrido alterações significativas, acompanhando a evolução industrial, desde a produção manual da revolução industrial até à indústria actual, altamente automatizada.

Com o aumento continuado da confiança em máquinas complexas e de elevado custo, as avarias ocorridas, nestas máquinas, afectam significativamente os lucros das empresas devido à perda de produção como consequência da não disponibilidade de equipamentos; ao custo de peças de substituição; ao risco de lesões nos operadores e à possibilidade de danos ambientais.

A resposta às pressões impostas por interesses industriais e governamentais, levou à implementação de sistemas de manutenção que minimizem os riscos de avarias em equipamentos. Consequentemente, houve um estímulo para a evolução tecnológica nesta área, de forma a disponibilizar meios de monitorização e avaliação das condições de elementos tribológicos e de sistemas mecânicos, ao invés de se aguardar pela ocorrência de avarias, ou pela substituição de peças de uma forma rotineira sem que existisse uma avaliação da sua condição.

O potencial impacto da manutenção ao nível das operações e da logística (flexibilidade, produtividade, qualidade) é considerável, logo, as implicações financeiras da manutenção podem ser consideráveis. O reconhecimento da manutenção como um potencial gerador de lucros é relativamente recente, tornando a manutenção, cada vez mais, como parte integrante do processo. Recentemente começa a haver a tendência de subcontratar os serviços de manutenção (*outsourcing*).

Actualmente existe, também, uma mudança da manutenção baseada na falha para a manutenção baseada no tempo de serviço, tendo vindo a aumentar a utilização de uma manutenção condicionada. Tem sido atribuída grande importância à disponibilidade, fiabilidade e segurança. Quanto aos recursos humanos, são necessários funcionários altamente qualificados e em formação contínua. O suporte informático tornou-se indispensável no armazenamento de informação, processamento dos dados históricos, controlo eficiente dos documentos, gestão de pessoal, emissões de ordens de trabalho.

Quadro 1. 1 - Evolução dos conceitos de manutenção

Anos	Conceito de Manutenção
<1950	– Mão-de-Obra – "Repara quando avaria" – A manutenção é: "Uma tarefa da produção" – "É um mal necessário"
1950 – 1975	– Mecanização (complexo) – "Eu opero, tu reparas" (disponibilidade, longevidade, custo) – A manutenção é: "Uma tarefa do departamento de manutenção" – "É um assunto técnico"

Quadro 1. 1 - Evolução dos conceitos de manutenção (cont.)

Anos	Conceito de Manutenção
>1975	– Automação (mais complexo) – RAM (Segurança, Qualidade, Ambiente) – A manutenção é: "Uma função não isolada", "Integração de esforços" – "Contribuição para os lucros"
→ "2000"→	– Globalização – A manutenção é: "Parceiro interno e externo" – A manutenção vai ao encontro da produção – "Parceiros"

1.3 – Tipos de Manutenção

De acordo com as intervenções, a manutenção pode ser classificada em duas grandes categorias, Manutenção Preventiva (MP) e Manutenção Correctiva (MC). A primeira, corresponde às acções de manutenção desenvolvidas sem que ocorra a avaria do sistema, abrangendo actividades de manutenção como a inspecção e substituição. A Manutenção Preventiva pode ser ainda dividida em Manutenção Planeada e Manutenção Condicionada. A Manutenção Correctiva corresponde às acções desenvolvidas depois da ocorrência de uma avaria do sistema e é relativa à reparação ou substituição de equipamento. A classificação das actividades de Manutenção pode ser representada da seguinte maneira:

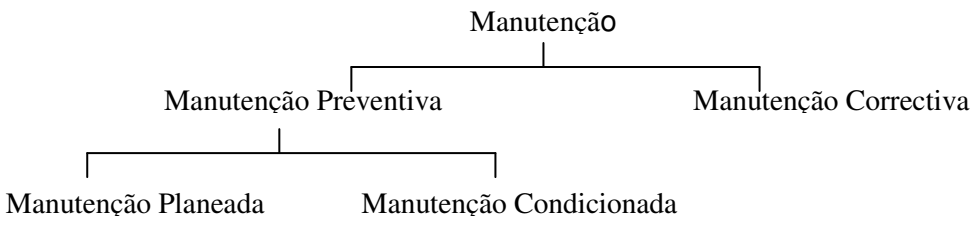


Figura 1. 1 - Diferentes tipos de manutenção

Os autores *Aven* e *Dekker* (1997), *Zheng* (1995), *Legat et al* (1996), *Wang e tal* (1997), *Vaurio* (1997) e *Procaccia* e tal (1997) desenvolveram modelos matemáticos com o objectivo de alcançar uma "política" de manutenção óptima, sustentada nos custos e numa actividade de manutenção uniforme. Estes autores assumiram que o sistema, depois de cada intervenção de MP, ficava como novo. Contudo, esta suposição não reflecte a realidade na maioria dos casos, pois o estado do sistema, depois de uma intervenção de MP, está entre "bom como novo" (*as good as new*) e "mal como anteriormente" (*as bad as old*). Habitualmente a MP não repõe o sistema no seu estado original, designando-se por isso reparação imperfeita e o sistema é considerado como estando renovado parcialmente.

Bevilacqua e *Braglia* (2000), consideraram 5 políticas de manutenção nomeadamente manutenção correctiva, manutenção preventiva, manutenção oportunística, manutenção condicionada e manutenção preditiva.

Bateman (1995) descreveu 3 tipos básicos de programas de manutenção incluindo a manutenção reactiva (manutenção correctiva), a manutenção preventiva e a manutenção preditiva. A manutenção preventiva e preditiva representam 2 estratégias proactivas, em que as empresas podem evitar interrupções causadas por falhas de equipamentos.

1.3.1 - Manutenção Correctiva

A característica principal desta política de manutenção, é que as acções de manutenção são activadas, apenas, quando existem avarias que implicam a paragem do equipamento. Não existindo intervenção sem que ocorra uma avaria. Esta política de manutenção, também designada por Manutenção Baseada na Falha ou Manutenção Reactiva, requer pouco ou mesmo nenhum planeamento. Tipicamente consiste no aguardar até que a falha ocorra, nesta altura a reacção é a da reparação dos danos causados. Esta, é a abordagem à manutenção mais simples e considerada eficaz quando os custos de falha e reparação são baixos. Segundo *Vanzile* (1992) a manutenção correctiva permite que uma instalação minimize a quantidade de mão-de-obra e os custos de manutenção necessários para manter o equipamento em funcionamento. A falha é definida e catalogada de forma a fornecer informação futura sendo atribuída uma prioridade consoante a urgência da reparação. Os procedimentos necessários à sua reparação são então accionados, e a reparação é efectuada, voltando o equipamento à sua condição original. Os autores *Bateman* (1995) e *Gallimore* (1988) consideraram que as desvantagens desta abordagem incluem a imprevisibilidade e a flutuação da capacidade produtiva, elevados níveis de valores fora dos limites de tolerância e o aumento global dos custos de manutenção para reparação de falhas catastróficas.

1.3.2 - Manutenção Preventiva

Referida pelos autores *Gits* (1992) e *Herbaty* (1990) como uma manutenção baseada no uso ("*use-base*"). Esta forma de manutenção compreende as actividades de manutenção que são tomadas após um determinado período de tempo ou tempo de serviço do equipamento. Esta forma de manutenção é baseada nas características fiabilísticas dos componentes. Estes dados de fiabilidade, tornam possível a análise do comportamento dos componentes e permitem a definição de um programa de manutenção que podem incluir a lubrificação do equipamento, substituição de componentes, limpeza e ajustes. A manutenção preventiva tem como objectivo determinar o número de inspecções, substituições e/ou revisão dos componentes com uma determinada frequência, relacionada com a taxa de avarias. Por outras palavras, a manutenção preventiva é eficaz na prevenção de problemas associados ao desgaste dos componentes. É evidente que, depois de uma verificação, nem sempre é necessário fazer a substituição do componente, a manutenção, por vezes, é suficiente. A desvantagem da manutenção preventiva é a necessidade de interrupção da produção em intervalos de tempo pré-definidos para acções de manutenção.

1.3.3 - Manutenção Oportunística

Bevilacqua e Braglia (2000) referem que a possibilidade de se utilizar esta forma de manutenção é determinada pela proximidade dos tempos de intervenção de diferentes componentes, no mesmo equipamento ou instalação. Este tipo de manutenção, pode levar à programação da paragem da instalação para uma determinada altura, para serem realizadas todas as acções de manutenção relevantes ao mesmo tempo.

1.3.4 - Manutenção Condicionada

Segundo os autores *Bevilacqua e Braglia* (2000) o conceito fundamental da manutenção baseada na condição, consiste na avaliação do sistema ou estrutura relativamente a vários aspectos e verificação do estado actual e do rendimento do processo. Um requisito para a aplicação deste tipo de manutenção é a disponibilidade de um conjunto de medidas e dados obtidos a partir da monitorização do sistema em tempo real. O acompanhamento das condições de funcionamento permite a identificação de uma situação anormal, permitindo ao administrador do sistema accionar os mecanismos necessários para resolver ou minimizar os efeitos consequentes da perturbação. A manutenção baseada na condição é segura e economicamente mais atractiva do que os métodos baseados na falha ou no tempo. A chave

para a manutenção baseada na condição é ter a capacidade de perceber ou assumir a condição do equipamento como resultado da sensibilidade, observação e teste.

A manutenção condicionada requer um suporte de gestão, com recursos que têm que ser atribuídos, e a utilização de planos para a obtenção de informação acerca do comportamento do sistema ou estrutura, assim como o estabelecimento de documentação e informação do histórico para fins comparativos. No decorrer do programa, as compensações decorrentes da diminuição das acções de manutenção compensam os custos despendidos para o desenvolvimento destes planos.

1.3.5 - Manutenção Preditiva

Ao contrário da manutenção condicionada, na manutenção preditiva os dados obtidos a partir do sistema são analisados de forma a encontrar uma tendência, tornando possível prever quando se atingirão os valores limite do sistema.

Além das 5 políticas de manutenção, anteriormente mencionadas pode referir-se ainda as seguintes filosofias de gestão da manutenção.

1.4 – Filosofias de Gestão da Manutenção

1.4.1 - Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance)*

A manutenção centrada na fiabilidade (RCM), consiste numa técnica com origem na indústria aeronáutica desenvolvida por *Nowlan* (1978), para o desenvolvimento de tarefas de manutenção baseadas nos princípios de que a fiabilidade de sistemas e o rendimento alcançado são função da qualidade do projecto.

O RCM começa com uma análise hierárquica dos modos de falha e análise dos efeitos (FMEA). O objectivo do FMEA é a identificação dos modos de falha para cada componente de um sistema, baseado na sua função. A análise da criticidade é por vezes utilizada para ordenar os modos de falha de acordo com a sua probabilidade de ocorrência e severidade. Os modos de falha são classificados como sendo evidentes, ou não ao operador durante o funcionamento normal, e posteriormente distinguidos de acordo com as consequências num determinado sector do processo (por exemplo, segurança, ambiente e economia). A partir da lista de resultados, um conjunto de questões é respondido de forma a determinar as acções de manutenção mais eficazes para a resolução ou minimização de cada modo de falha. O resultado pode ditar que

num intervalo de tempo, que determina a condição do equipamento, a opção pode ser "renovar" o componente, eliminar o componente, ou não fazer nada. Pode ainda sugerir que os modos de falha não podem ser minimizados através de acções de manutenção e têm que ser redimensionados.

Este tipo de análise torna-se rapidamente muito complexa em certos ambiente industriais, como por exemplo, indústrias químicas. Além disso, as consequências das falhas podem ser afectadas pelas circunstâncias, pela responsabilidade organizacional e pelo tipo de falha. Embora o RCM contemple toda a instalação, o RCM estrutura a avaliação através da inspecção de cada máquina. Este facto, pode ser uma desvantagem no caso de sistemas técnicos muito diferentes, de idades diferentes (tempo de serviço) e diferentes tecnologias que estão dispersos geograficamente. Resumindo, uma das maiores desvantagens do RCM é a sua complexidade e como consequência o seu custo.

A fiabilidade em vez da disponibilidade e da manutibilidade é o objectivo principal. Uma abordagem deste tipo é justificável nas indústrias aeronáuticas e aéreas e em indústrias de alta tecnologia e de elevado risco, mas implica elevados custos nas indústrias comuns, onde a manutenção é um problema económico em vez de ser um problema de fiabilidade.

1.4.2 - Manutenção Produtiva Total –TPM (Total Productive Maintenance)

O TPM baseia-se na Manutenção Produtiva, introduzida em 1950 pela "*General Electric Coorporation"*. Mais tarde, foi desenvolvida no Japão com o objectivo de servir de suporte à implementação da produção "*just-in-time* e posteriormente re-importada para o Ocidente.

Apesar da manutenção ser o componente chave do TPM, na realidade não é apenas um conceito de manutenção. O TPM é muito mais abrangente do que um conceito de manutenção, no entanto é incompleto como conceito de manutenção, devido a não fornecer regras claras para a decisão de que políticas de manutenção deverão ser utilizadas. De facto, o TPM é cada vez mais traduzido como "*Total Productive Manufacturing*" ou "*Total Productive Management*", ou seja, o TPM é considerado como uma estratégia de gestão.

O TPM, é uma abordagem de melhoria contínua do rendimento e da eficiência das actividades industriais e em primeiro lugar da manutenção. Para isso, utiliza a eficiência global do equipamento (OEE – *Overall Equipment Effectiveness*) que é resultado da disponibilidade do produto, da rapidez e da qualidade. Segundo o autor *Macaulay* (1988) este OEE, é calculado através da redução da disponibilidade teórica para 100%, sistematicamente através da medição das "seis grandes perdas":

- Falha de equipamento (perda por paragem)
- Montagem e ajustes (perda por paragem)
- Inactividade e pequenas paragens (perda de velocidade)
- Diminuição de velocidade (perda de velocidade)
- Defeitos no processo (perda de qualidade)
- Perdas de produção

O objectivo do TPM, é maximizar a eficiência do equipamento utilizando o OEE como medida. Para atingir a melhoria global, o TPM esforça-se no desenvolvimento da condição óptima Homem-Máquina. Para alcançar este objectivo, o modelo TPM é baseado em 5 pilares:

- Melhoria individual do equipamento, para eliminar as "Seis grandes perdas";
- Manutenção autónoma;
- Manutenção preventiva planeada;
- Formação em técnicas de manutenção;
- Plano de manutenção e gestão precoce do equipamento (EEM – *Early Equipment Management*)

Nakajima (1988), considerado o pai do TPM, descreve o TPM nos seguintes 5 pontos:

1. Procura atingir o máximo de eficiência na utilização dos equipamentos (melhoria geral da eficiência);
2. Estabelece um programa completo de manutenção produtiva envolvendo a manutenção preventiva, e melhorando a manutenção relacionada com o ciclo de vida do equipamento;
3. É implementado em equipas e requer a participação dos projectistas e operadores do equipamento e funcionários do departamento de manutenção;
4. Envolve todos os trabalhadores, desde o topo até ao funcionário mais baixo da hierarquia;
5. Promove e implementa a manutenção produtiva baseada em actividades autónomas de pequenos grupos.

Segundo *Maggard* (1989) o TPM tem sido descrito como um parceiro de manutenção. Com a implementação do TPM, pequenos grupos ou equipas criam uma relação de cooperação entre

a manutenção e a produção, que ajudam na realização do trabalho de manutenção. Por outro lado, os operários da produção envolvem-se na realização de trabalhos de manutenção, permitindo-lhes um papel na monitorização e conservação do equipamento. Este procedimento aumenta a perícia dos operários da produção, fazendo com que estes se tornem mais eficazes na manutenção do equipamento em bom estado de conservação. As equipas têm um papel fundamental no TPM, as actividades das equipas envolvem grupos da manutenção, produção e engenharia. *Nakajima* (1988) integra a competência técnica dos engenheiros, a experiência dos operários da manutenção e dos operários do equipamento destas equipas. Os autores *Adair-Heeley* (1989) e *Maggard* (1989) consideram que o objectivo das actividades destas equipas é a melhoria do desempenho dos equipamentos através da comunicação dos potenciais ou actuais problemas.

Segundo os autores *Adair-Heeley* (1989) e *Goto* (1989), a melhoria na manutibilidade e na prevenção da manutenção são duas equipas da TPM. A equipa da prevenção da manutenção trabalha para a melhoria do desempenho do equipamento através da melhoria do projecto do equipamento. A função da manutenção trabalha com o departamento de engenharia durante a fase inicial do projecto de equipamento, permitindo que a equipa projecte e faça a instalação do equipamento de forma a facilitar a manutenção e o funcionamento com o equipamento.

Nakajima (1988) considera que a equipa da melhoria da manutibilidade tem como objectivo a melhoria do desempenho das acções de manutenção. Segundo *Teresko* (1992) e *Goto* (1989) a manutenção, os operários de produção, os operários especializados e os engenheiros trabalham em conjunto na identificação e correcção das condições que dificultam a manutenção. Desta forma, é possível obter-se uma gama de soluções a serem consideradas e utilizadas de forma apropriada.

Contrastando com outros conceitos de manutenção, o TPM não tem nenhum impedimento económico para a empresa. O cálculo do OEE como resultado da disponibilidade, velocidade e qualidade, não é contudo, uma análise completa. Os custos e os lucros não são tidos em consideração, logo, não é uma medida completa, em que máquinas equivalentes possam ser comparadas. Esta é outra razão, pela qual o TPM é considerado como um conceito de manutenção incompleto.

O TPM é uma abordagem de manutenção agressiva que visa a melhoria do desempenho dos equipamentos enquanto continua a prevenir a falha de equipamentos.

1.4.3 - Actividade Centrada na Fiabilidade –BCM (*Business Centred Maintenance*)

O BCM é um conceito da manutenção desenvolvido por *Kelly* (1984, 1997). Este conceito baseia-se na identificação dos objectivos da actividade, que são depois traduzidos em objectivos de manutenção. Este conceito requer um número excessivo de dados relativos ao processo produtivo, ao plano de produção, à quantidade de trabalho e à disponibilidade prevista do sistema.

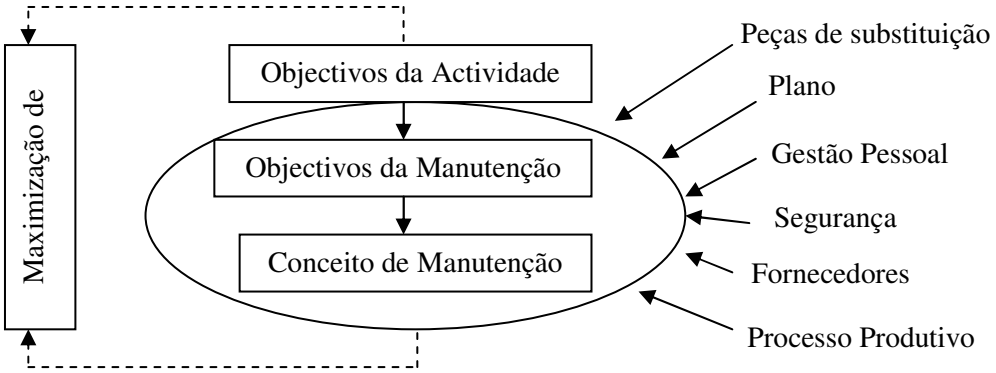


Figura 1. 2 - Abordagem BCM; Maximização de lucros

Kelly (1984, 1997) concentrou-se no estabelecimento de um conceito de manutenção "Pronto a usar". O autor fornece linhas orientadoras para o desenvolvimento de actividades de manutenção e tem como objectivo a melhor combinação das actividades de manutenção para os vários itens das instalações. O objectivo principal do BCM é maximizar a contribuição da manutenção nos lucros da empresa. Esta é a principal diferença entre o BCM e o RCM, em que este último é mais focado na maximização do desempenho técnico. Para ser bem sucedido, o BCM encara a instalação com todos os seus componentes, cada um com necessidades de manutenção diferentes e interagindo de forma, que pode ser, muito complexa. Para implementar o BCM, eficientemente, é necessário muita informação, até mesmo mais do que no RCM, o que poderá ser um problema.

1.4.4 – Inspecção Baseada no Risco –RBI (*Risk Based Inspection*)

A Inspecção baseada no risco é um processo de identificação, avaliação e mapeamento de riscos industriais (causados por corrosão, fracturas, etc.) capazes de comprometer a integridade tanto dos equipamentos de pressão como de elementos estruturais. A RBI abrange riscos que podem ser controlados mediante inspecções e análises adequadas.

Segundo *Chang* (2005), em teoria o risco em RBI pode ser definido como a combinação da probabilidade de ocorrência da falha (LOF) e a consequência da falha (COF). Basicamente, existem três níveis analíticos: qualitativo, semiquantitativo e quantitativo. A análise qualitativa pode ser implementada fazendo uma auditoria à LOF e à COF. Na prática, o LOF é avaliado tendo em conta a quantidade de equipamento, os possíveis mecanismos danificados, a eficácia de inspecção, as condições actuais do equipamento e a natureza do processo e do equipamento. Nos mecanismos danificados inclui-se a corrosão geral, ruptura por fadiga e exposição a altas e baixas temperaturas. Na determinação da categoria da consequência da falha, a RBI considera dois potenciais perigos principais: o risco do fogo/explosão e o risco tóxico. O risco de fogo/explosão é relacionado com propriedades físicas dos produtos químicos, fugas, quantidade e tipo de descarga e medidas da protecção. O risco tóxico está associado à quantidade e à toxicidade, à escala da dispersão e à densidade de população. O resultado do risco pode ser usado para limitar áreas de potencial interesse e decidir que zonas do processo exigem mais importância em termos de inspecção ou mesmo implementação de outros métodos de redução do risco.

Em simultâneo com a análise qualitativa, pode ser desenvolvida uma análise semiquantitativa considerando os resultados da inspecção, como a taxa de corrosão, registos históricos e informação de acções de manutenção.

De acordo com as potenciais perdas, o método quantitativo pode determinar níveis de risco. O LOF representa a frequência de falha (GFF) genérica para um tipo específico de equipamento, o qual é baseado em dados compilados a partir do histórico de falhas em equipamentos existentes, multiplicado por um factor de modificação do sistema e por um factor de avaliação do sistema de gestão. O COF pode ser avaliado com as perdas, ou seja perigo, meio ambiente, impacto na interrupção da produção e perdas relacionadas com despesas de manutenção.

1.5 - Planeamento da Manutenção

Cabe aos gestores seleccionar a melhor política de manutenção para cada componente/equipamento/sistema, de entre várias alternativas, como por exemplo: manutenção preventiva, manutenção correctiva, manutenção oportunística, manutenção condicionada, manutenção preditiva.

O planeamento da manutenção está relacionado com a definição da melhor estratégia para cada equipamento (componente) dependendo da disponibilidade requerida e dos meios

disponíveis. Para cada componente, de acordo com a sua taxa de avarias, custo e consequências da avaria no sistema, deve ser estudada a melhor solução: prevenir a avaria ou esperar que ela aconteça. No caso de se optar pela prevenção, a equipa de manutenção deve avaliar se será preferível um acompanhamento progressivo da condição do sistema ou a realização de inspecções periódicas.

Uma boa política de manutenção deve definir estratégias diferentes para máquinas diferentes. Algumas destas estratégias irão afectar o normal funcionamento do sistema, outras estarão relacionadas com a segurança da instalação e outras irão significar elevados custos de manutenção. A sobreposição destes "efeitos" permite atribuir prioridades diferentes a cada componente ou equipamento da instalação, e concentrar os esforços técnicos e económicos nas áreas onde se esperam obter os melhores resultados.

Após seleccionar a melhor política de manutenção, o segundo nível de decisão envolve a selecção dos critérios de manutenção, como por exemplo, a definição da frequência de manutenção óptima. Este nível de decisão, requer a recolha de dados durante o funcionamento do equipamento.

Muitos aspectos têm que ser considerados, no primeiro nível, quando se selecciona o tipo de manutenção. Esta selecção envolve muitos aspectos como: investimento necessário, problemas de segurança, problemas ambientais, custos de avarias, fiabilidade da política, tempo médio entre avarias (*Mean time between failure – MTBF*) e tempo médio de reparação (*Mean time to repair – MTTR*). Muitos destes factores, não são facilmente avaliados. Certos critérios como o MTBF e o MTTR só podem ser estimados a partir de dados históricos de equipamentos semelhantes a operar em condições idênticas. Quando não existem dados históricos de fiabilidade e dados relacionados com os custos de manutenção, inicialmente o plano de manutenção define-se com base em dados fiabilísticos retirados da literatura e dos manuais técnicos dos equipamentos. Esta informação será actualizada, à medida que os dados da própria instalação vão sendo recolhidos. A análise do sistema é estruturada de uma forma racional com o objectivo de manter a actualização do processo tão objectiva quanto o possível. O processo deve ser acompanhado através da utilização de mapas de procedimento, avaliação bem compreendida de diferentes parâmetros e de uma análise simples e clara de intervenções correctivas.

1.6 – Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade

Em engenharia, a fiabilidade representa a probabilidade de um sistema ou componente desempenhar a função que lhe está atribuída em determinadas condições e num intervalo de tempo específico. Para um sistema, a fiabilidade, normalmente, depende do aumento do tempo de serviço do sistema. Para manter a performance do sistema é necessário efectuar uma manutenção adequada, durante o seu ciclo de vida.

A metodologia da fiabilidade centrada na manutenção (*Reliability Centered Maintenance – RCM*) é provavelmente a técnica mais utilizada. O RCM representa um método para preservar a integridade funcional sendo desenvolvida com o objectivo de minimizar custos da manutenção, fazendo um balanço entre os elevados custos de manutenção correctiva e os custos da manutenção preventiva, tendo em consideração a perda de vida útil dos equipamentos em questão.

Uma das ferramentas mais utilizadas pelas empresas para categorizar equipamentos em vários grupos de risco é baseada no conceito da análise dos efeitos dos modos de falha e sua criticidade (F*ailure Mode Effect and Criticality Analysis – FMECA*). Esta metodologia tem sido proposta com diversas variantes, em termos da relevância dos critérios considerados e da formulação do número de risco prioritário (*Risk Priority number – RPN*). Utilizando esta aproximação, a selecção da política de manutenção é desenvolvida através da análise do RPN obtido. Numa instalação com mais de 200 equipamentos, através da utilização desta metodologia consegue-se fazer a divisão dos equipamentos em 3 grupos homogéneos. O problema é definir a melhor estratégia de manutenção para cada grupo.

Para integrar a criticidade, *Bevilacqua e Braglia* (2000), apresentam um método de decisão do tipo Multi-Atributos baseado no Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierachy Process* - AHP), para seleccionar a estratégia de manutenção mais adequada a cada grupo de máquinas. Neste procedimento, os custos e benefícios de cada alternativa de manutenção são avaliados e organizados numa estrutura hierárquica. Finalmente, considerando que o responsável pela manutenção não pode ter a certeza absoluta acerca da importância relativa da decisão tomada, para melhorar a eficácia do AHP é utilizada a Análise de Sensibilidade.

A engenharia da fiabilidade teve origem na indústria aeroespacial em 1950, quando a taxa de avarias dos sistemas electrónicos militares resultaram num elevado custo e na limitação do fornecimento. Com realce para a recolha de dados, a análise estatística e a análise de risco, esta disciplina da engenharia adquiriu credibilidade significativa no fornecimento de probabilidades com que cada componente ou sistema irá desempenhar uma determinada função sem que

ocorram avarias, sob um determinado conjunto de condições. Este facto é baseado no conhecimento das falhas previsíveis e como se tornam evidentes ao longo do tempo.

O processo de falha em componentes mecânicos é, normalmente, complexo e desenvolve-se no mínimo em 3 etapas: falha inicial, a falha por ruptura e as falhas que ocorrem entre as duas anteriores. A figura seguinte, designada por Curva da Banheira, representa o comportamento típico de uma falha em equipamentos mecânicos.

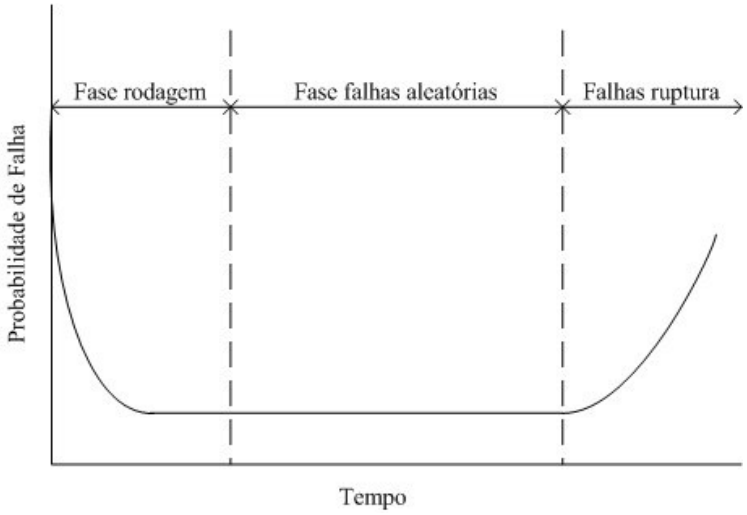


Figura 1. 3 - Curva da Banheira

Num sistema bem dimensionado, a maioria das falhas são aleatórias, como pode ser analisado na figura anterior, com uma probabilidade de ocorrência baixa e praticamente constante.

A aplicação de técnicas de avaliação de sistemas de fiabilidade tem ganho importância devido à sua eficácia na detecção, prevenção e correcção de falhas nas fases de projecto, produção e funcionamento de um produto. O aumento da importância da qualidade e da fiabilidade de produtos e sistemas, juntamente com a pressão da minimização de custos, e o acentuar da necessidade de estudar e quantificar a fiabilidade tem como objectivo alcançar projectos inovadores.

A engenharia da fiabilidade cresceu significativamente, nas últimas 5 décadas (desde a 2ª guerra mundial) de forma a englobar várias áreas, como a análise fiabilistíca, teoria das falhas e modelação, distribuição e optimização da fiabilidade, modelação e desenvolvimento da fiabilidade, testes fiabilísticos, análise de dados e construção de gráficos, controlo de qualidade.

A produtividade e eficácia dependem da utilização eficiente dos recursos e necessidades, a atribuição adequada daquilo que é tipicamente decidido pelo processo de engenharia, maioritariamente no projecto e em fase de funcionamento (estrutura do processo,

calendarização, controlo). Contudo, é a disponibilidade do processo que determina criticamente se os recursos e necessidades estão disponíveis para serem utilizados como planeados. A disponibilidade é geralmente definida como a capacidade de um componente desempenhar a função que é requerida num determinada instante de tempo ou num certo intervalo de tempo (NP EN 50126, 2000). Em termos de processo químico, corresponde à percentagem do tempo em que o processo está apto a produzir. Actualmente, com a nova tecnologia e engenharia levam a que as instalações sejam altamente integradas e que a falha numa parte do processo pode influenciar o rendimento total da instalação, a disponibilidade é largamente reconhecida como sendo uma das características operacionais mais importantes. Por outro lado, a disponibilidade está ligada ao rendimento da instalação em termos de impacto ambiental e de segurança. Segundo *Michelsen* (1998), novas e mais apertadas regulamentações foram impostas à indústria no sentido de uma exigência de disponibilidade específica para os sistemas de segurança. Para realçar as consequências da perda de disponibilidade, *Tan & Kramer* (1997) deduziram que as perdas produtivas numa instalação química podem atingir entre os $500 e os $100 000 por hora. No caso particular de refinarias os custos totais de perdas produtivas, segundo *Nahara* (1993), podem atingir os milhões de dólares

A disponibilidade de um processo é função da fiabilidade e manutibilidade dos equipamentos e dos processos.

A fiabilidade é a capacidade de um componente desempenhar determinada função, sob determinadas condições operacionais e ambientais, num certo período de tempo (NP EN 50126, 2000). Por outro lado, a manutibilidade é a capacidade de um componente, em condições específicas de funcionamento, se manter ou ser restaurado a um estado em que o seu desempenho satisfaça as funções exigidas, enquanto a manutenção é desenvolvida em condições definidas e utilizando os procedimentos e recursos pré-estabelecidos (NP EN 50126, 2000).

Os autores *Kapur* e *Lamberson* (1977) consideram que as características de fiabilidade (por exemplo, características do equipamento, configuração do sistema, redundância) e certas características de manutibilidade (acessibilidade aos componentes, peças de substituição, consumíveis) são atributos inerentes ao processo, estabelecidos durante a fase de projecto e que não podem ser alterados sem que exista uma alteração no projecto. Como resultado, em condições de funcionamento de um processo, a forma de alcançar elevada disponibilidade é através da derivação e execução de estratégias de manutenção efectivas.

Através do impacto da manutenção na disponibilidade do processo, a manutenção afecta a produção e a segurança, nomeadamente de um processo químico. Especialmente, a manutenção

efectiva contribui para a manutenção dos níveis de produção num determinado valor, através da redução de custos fixos e operacionais (peças de substituição e consumíveis) e afastando o sistema de possíveis situações de risco.

Vanrijn (1987) considera que apesar de todos os benefícios, a manutenção é geralmente muito dispendiosa embora, o planeamento das acções de manutenção aumente os lucros (mais-valias) do processo, existe uma relação entre os lucros do processo e os custos de manutenção. Logo, a optimização da manutenção é descrita como uma tentativa de identificação de estratégias de manutenção que conduzam a níveis de disponibilidade do processo que mantenham um balanço entre o rendimento do processo e os custos de manutenção de forma a maximizar os lucros do processo. Os autores *Vassiliadis* e *Pistikopoulos* (2001), propõem que o modelo de optimização da manutenção leve à determinação do balanço óptimo entre os custos e os benefícios de manutenção, tendo em consideração todo o tipo de especificações e restrições.

1.7 – Avarias

As avarias em equipamentos ocorrem de muitas maneiras diferentes e com origens diversas. Para prevenir a sua ocorrência, de forma imprevista, é necessário implementar uma estratégia baseada em acontecimentos anteriores, no conhecimento da condição actual do equipamento e da adopção de acções de manutenção efectivas.

- Conhecimento do Histórico do Equipamento

Segundo *Bloch and Geitner* (1994) a metodologia da análise de falhas evoluiu até ao ponto de se tornar numa metodologia de rotina, simples e clara. É imperativo que a evidência (ocorrência) seja registada e que todos os procedimentos e componentes sejam completamente documentados de forma a garantir a existência de um registo minucioso. Antes de definir os passos necessários à investigação da falha, primeiro é necessário determinar o tratamento que os dados obtidos vão ter. Por exemplo, se a informação relativa ao modo de falha vai ser utilizada na modelação de falhas, ou se vai ser utilizada para analisar o comportamento do equipamento no seu ambiente.

- Controlo Estatístico

Cowan e Winer (2001) consideram que o controlo estatístico, pode ser definido de uma maneira geral, como sendo um conjunto de métodos matemáticos e de engenharia que

colaboram na monitorização e na melhoria da qualidade de um processo. O controlo estatístico tem evoluído desde 1920, inicialmente com o desenvolvimento da estatística baseada na amostragem e nos métodos de inspecção dos Laboratórios da *Bell Telephone* e mais tarde amadurecido com a 2ªGuerra Mundial.

Na avaliação da possibilidade de falha, o objectivo do controlo estatístico é comparar um conjunto de medidas, de um dado produto ou processo, com um conjunto de especificações. Estas especificações, designadas por Limites de Tolerância são estabelecidas pelo cliente ou pela equipa de projecto. Matematicamente, os limites de tolerância são um conjunto de limites, entre os quais é expectável encontrar uma parte da população. Se é conhecido ou assumido que um parâmetro segue a Distribuição Normal, com média, μ, e variância, σ^2, então os limites de tolerância podem ser construídos a qualquer nível de confiança para uma parte da população utilizando tabelas cumulativas da Distribuição Normal. Quando se verificar a existência de medidas, cujo valor se encontre fora dos limites de tolerância, é evidência de problemas no processo.

Teoricamente, todos os processos podem ser caracterizados por uma certa variação, no caso de serem analisados com instrumentos de resolução suficiente. Quando a variação é ocasional o processo diz-se que está controlado estatisticamente. Contudo, pode existir uma situação em que a variação no processo é afectada por uma causa imputável, como por exemplo o aquecimento de um componente da máquina. O potencial das cartas de controlo, quer seja um controlo por atributos ou por variáveis, consiste numa linha central a que corresponde o valor médio de qualidade do processo quando controlado estatisticamente, e em duas linhas limites de controlo designadas por Limite Superior e Limite Inferior de Controlo. Na figura seguinte encontra-se um exemplo típico de uma carta de controlo:

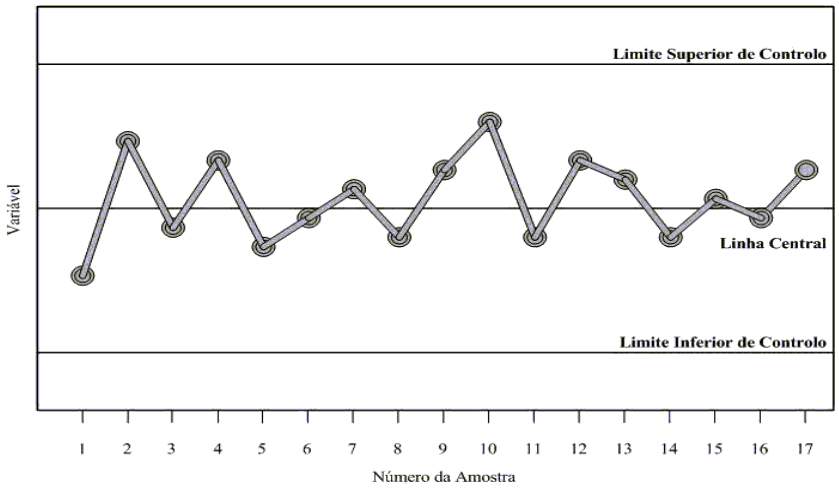


Figura 1. 4 - Exemplo de uma carta de controlo

Os limites de controlo são escolhidos, de forma a possibilitarem a identificação de valores próximos desta zona, o que significaria uma falha no controlo estatístico. O método consiste na recolha periódica de uma amostra aleatória, na quantificação do seu valor e registo na carta de controlo. Podem ser utilizadas outras ferramentas para avaliar o desempenho do sistema, incluindo histogramas, diagramas de Pareto, diagramas de causa-efeito e diagramas de concentração de defeitos.

O fundamental na aplicação do controlo estatístico é a determinação das variáveis adequadas ao controlo. O número de cartas de controlo a utilizar não é tão importante como a utilização da carta apropriada no local certo e á hora certa, de forma a permitir que os operadores e chefias encontrem e eliminem a fonte de um possível problema.

Neste capítulo, apresentou-se como o conceito de manutenção tem evoluído ao longo do tempo, havendo a tendência actualmente de o integrar na filosofia das empresas. Classificou-se a manutenção em 2 grandes classes, a Manutenção Preventiva e a Manutenção Correctiva. A Manutenção Preventiva pode ser ainda dividida em Manutenção Planeada e Manutenção Condicionada. Foram também referidas filosofias de gestão da manutenção, nomeadamente a Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM), a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Actividade Centrada na Fiabilidade (BCM).

CAPÍTULO 2

Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

PÁGINA EM BRANCO

No capítulo 2 serão descritos os vários tipo de análise de falhas e seus efeitos (FMEA), assim como os princípios para o desenvolvimento desta metodologia.

2.1 - Introdução

A análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA) é uma ferramenta muito útil na análise de sistemas de engenharia e pode definir-se de uma forma muito simples como sendo uma abordagem à análise de cada modo de falha do sistema e das consequências ou efeitos provocados por esse modo de falha no sistema. Quando a análise FMEA é alargada à análise dos modos de falha considerando a sua criticidade, a metodologia passa a ser designada por análise dos modos de falha, seus efeitos e da sua criticidade (FMECA).

Esta metodologia, é implementada em equipa, e considera o modo de falha do produto ou processo (perda da função produtiva) e posteriormente, descreve o efeito expectável da falha num nível superior (efeito da falha no cliente ou utilizador).

A história da metodologia FMEA tem início nos anos 50 com o desenvolvimento dos sistemas de controlo de voo, quando o "*Navy´s Bureau of Aeronautics*" dos Estados Unidos desenvolveu o procedimento designado por "Análise de Falhas". Subsequentemente, *Coutinho* (1963-1964) criou o termo "Análise dos Efeitos de Falhas" e o "*Bureau of Naval Weapons"* introduziu-o nas suas novas especificações de controlo de voos. A análise FMECA foi desenvolvida pela "*National Aeronautics and Astronautics Administration (NASA)*" para assegurar a fiabilidade desejada dos sistemas espaciais.

Em 1970, o departamento de defesa dos Estados Unidos, direccionou os seus esforços no desenvolvimento de uma norma militar MIL-STD-1629 designada por "*Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis*" (Procedimento para o desenvolvimento da análise dos modos de falha, seus efeitos e sua criticidade).

A análise FMEA tornou-se mais conhecida com a sua aplicação na indústria automóvel *Ford* em 1977, com o objectivo de quantificar potenciais falhas de projecto do produto. Os manuais de instruções da *Ford* ("*Ford Motor Manual*") servem de base bibliográfica a este tema, mas também *Feigenbaum* (1991), *Juran* (1989) e *Stamatis* (1995) documentaram a análise FMEA.

Actualmente a metodologia FMEA/FMECA é muito utilizada na indústria para análise de sistemas, particularmente nas áreas aeroespacial, defesa e produção de energia nuclear.

O primeiro passo numa boa metodologia FMEA é a definição dos seus objectivos, e o principal objectivo de uma análise FMEA é a identificação precoce de potenciais problemas que possam chegar ao cliente ou utilizador. A identificação precoce de problemas é necessária para se alcançar o sucesso do desenvolvimento de um novo produto ou processo.

2.2 – Termos e Definições

Dhillon (1999) define alguns termos específicos utilizados na implementação de uma análise FMEA/FMECA:

Causa da Falha: Factores como defeitos de projecto, defeitos de qualidade, problemas no processo físico ou químico, ou má aplicação de equipamento são as principais razões para a ocorrência de falhas, ou que dão início ao processo físico através do qual a deterioração conduz à falha.

Modo de Falha: O modo ou a forma através da qual a falha se manifesta, ou seja, é detectada.

Efeito da falha: A(s) consequência(s) que um modo de falha tem na função de um componente, operação ou estado do sistema.

Criticidade: Medida relativa da consequência de um modo de falha e a sua frequência de ocorrência.

Severidade: Consequência de um modo de falha, tendo em consideração o pior cenário da falha. Determinado por factores como danos na instalação e extensão dos danos.

Acção Correctiva: Alterações no projecto, no processo, no procedimento ou nos materiais utilizados e validados para rectificação das causas das falhas ou da deficiência do projecto.

Análise da Criticidade: Uma abordagem, em que, cada modo de falha é classificado de acordo com a combinação da influência da ocorrência, detecção e severidade.

Falha Indetectável: Modo de falha em que não existe nenhum método disponível para

a sua detecção e forma de alerta do operador.

Efeito Local: A consequência ou consequências que um modo de falha tem na função, operação ou estado de um item em análise.

2.3 – Tipos de FMEA

A análise FMEA pode ser classificada em 3 tipos, FMEA do Projecto, FMEA do Processo e FMEA de Componente.

A análise FMEA do projecto é um procedimento para identificar os materiais adequados a utilizar, responder às especificações do cliente, e assegurar que as regulamentações governamentais são respeitadas, antes da finalização do projecto. Os engenheiros de projecto do produto são normalmente os líderes da equipa da FMEA do projecto.

Por outro lado, a análise FMEA do processo engloba o processo produtivo e o processo de montagem. A análise FMEA do processo, tradicionalmente, tem início assim que o relatório da análise FMEA do projecto fica disponível. Identifica todas as potenciais falhas que possam ser causadas pelo processo produtivo ou durante a montagem, pelas máquinas, instalações e métodos produtivos. Os engenheiros do processo ou da produção são normalmente os líderes da equipa do FMEA do processo.

2.3.1 - FMEA do Projecto

O objectivo de desenvolvimento da metodologia FMEA do projecto é a identificação e eliminação dos modos de falha de um produto durante a sua fase de concepção e desenvolvimento. Este tipo de análise FMEA pode ser desenvolvido ao nível dos componentes, subsistemas, sistemas e o seu objectivo é validar os parâmetros de projecto escolhidos para um requisito funcional de rendimento específico, baseado em informação com origem nos clientes e em especificações.

A equipa do FMEA do projecto verifica os problemas dos componentes, os problemas de funcionalidades, os problemas de especificações e, posteriormente enumera todas as falhas possíveis e inicia a comunicação com os fornecedores e com os clientes. Os membros da equipa discutem os possíveis modos de falha do produto com os seus clientes com o objectivo de fazer possíveis alterações nas especificações do produto, para melhorar o seu projecto. Para desenvolver esta tarefa os engenheiros do produto desenvolvem uma Árvore de Análise de

Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*) para determinar o modo de como devem modificar o projecto para eliminar as potenciais falhas com origem no projecto. Comunicam também, com os engenheiros do produto para melhorar a produção do produto. Informam os fornecedores acerca dos potenciais problemas em componentes ou possível melhoria com o objectivo final de melhorar o produto.

As vantagens no desenvolvimento de uma análise FMEA durante o projecto incluem:

- A identificação de modos de falha relacionados com o projecto ao nível do sistema/subsistema/componente;
- Identificação de características importantes de um dado projecto;
- Documentação de alterações de projecto para conduzir o projecto de futuros produtos;
- Ajudar na avaliação do objectivo do projecto e na avaliação de alternativas de projecto;
- Aproximação sistemática na redução da criticidade e do risco;
- Armazenamento de dados que servirão como dados históricos nas acções desenvolvidas durante o desenvolvimento de novos produtos;
- Ferramenta útil no estabelecimento de prioridades das acções para a melhoria do projecto.

No FMEA do projecto, existe um problema inerente que são as possíveis falhas dos componentes. Estas falhas, podem ser dos fornecedores ou do processo selectivo dos materiais sendo necessárias avaliações de componente a componente no FMEA do projecto, podendo ser desenvolvido um FMEA suplementar, designado por FMEA do componente para analisar os potenciais modos de falha do componente como parte do FMEA do projecto.

2.3.2 - FMEA do Processo

O objectivo do FMEA do processo é:

- Identificar e prevenir que produtos defeituosos cheguem ao cliente;
- Identificar potenciais modos de falha do processo;
- Identificar as potenciais causas das falhas;
- Identificar as variáveis importantes do processo;

- Avaliar os potenciais efeitos da falha no cliente;
- Estabelecer acções que visem a melhoria do processo;
- Desenvolver controlos para prevenir ou detectar as causas das falhas.

Por outras palavras, o objectivo do FMEA do processo é analisar as características do produto descritas no projecto, relativamente ao processo de produção ou montagem, afim de assegurar que o produto resultante satisfaça as necessidades e expectativas do cliente.

O FMEA do processo inicia-se com a construção de um diagrama de blocos do processo. Este diagrama de blocos fornece uma visão global de todo o processo produtivo de um componente. O diagrama de blocos deve apresentar a sequência de cada operação produtiva e mostrar como estas funções originam as características requeridas do produto.

O FMEA do processo identifica as potenciais falhas do processo e determina as possíveis causas nas operações de produção e montagem. Os efeitos das falhas nos clientes são cruciais na ordenação dos modos de falha. Depois de se apurar todos os modos de falha possíveis, determinam-se as causas de cada modo de falha utilizando várias técnicas de melhoria da qualidade para a resolução de problemas como por exemplo, o desenho de experiências, análise de *Pareto* e experiências anteriores com produtos semelhantes. Posteriormente, a equipa FMEA deverá obter a probabilidade de ocorrência da falha, a severidade com os efeitos globais e os actuais métodos de detecção/controlo. A probabilidade de ocorrência de falha é baseada na experiência dos técnicos, na experiência em processos ou produtos anteriores, na análise da distribuição de *Weibull* (A distribuição de Weibull, é uma distribuição de probabilidade contínua, usada em estudos de tempo de vida de equipamentos e estimativa de falhas), e outras análises estatísticas. A severidade, com os efeitos inerentes, é proveniente de testes elaborados, dados históricos e experiência dos técnicos. Neste ponto, a equipa FMEA enumera os possíveis efeitos causados pelas falhas e determina os métodos de detecção a serem utilizados no processo produtivo para cada modo de falha.

As acções correctivas tomadas para cada modo de falha no FMEA do processo eliminam as causas das falhas no processo produtivo/montagem, os efeitos nos clientes e as condições de ocorrência das falhas.

A modificação do procedimento baseado no relatório do FMEA do processo deve incluir a revisão dos métodos de controlo actuais e a evolução do plano de controlo do processo. O plano de controlo é um elemento importante de todo o sistema de qualidade, pois determina as rotinas e os métodos de inspecção.

2.3.3 - FMEA de Componentes

Ao contrário da análise FMEA do projecto, que considera a integração de diferentes componentes e a interacção dos efeitos na função dos produtos, uma análise FMEA de componentes considera apenas a selecção de materiais e a produção dos componentes. Alguns projectistas inexperientes podem projectar componentes de difícil produção. Este tipo de projecto irá afectar os custos, a função e a montagem do produto. O FMEA de componentes pode fornecer informação aos fornecedores de materiais para avaliar e sugerir alterações de projecto com o objectivo de minimizar erros e dificuldades na produção de componentes e para simplificar e melhorar o projecto.

2.4 – Desenvolvimento de uma análise FMEA

Na prática as falhas têm origem na produção, no entanto são geradas na fase de projecto e desenvolvimento do produto. A análise FMEA fornece uma metodologia sistemática para a identificação de falhas e dos riscos associados. Os problemas são identificados e as medidas correctivas/preventivas são asseguradas. Existe uma metodologia padrão para desenvolver esta análise, utilizando uma equipa com conhecimento específico da matéria. A metodologia é a seguinte:

- Identificação e descrição dos modos de falha e das suas consequências;
- Determinação da possibilidade das falhas ocorrerem;
- Determinação da possibilidade das falhas serem detectadas;
- Determinação da severidade das consequências da falha;
- Cálculo do risco;
- Hierarquização das falhas com base no risco;
- Intervenção nas falhas de maior risco;
- Verificação da eficácia das acções desenvolvidas para redução dos riscos mais elevados através de novo cálculo de risco.

A figura 2.1 representa o procedimento geral da metodologia FMEA. A primeira fase inicia-se com a recolha de informação e termina com o cálculo do número de risco prioritário (RPN). As acções da segunda fase incluem os índices do RPN, a recomendação de acções correctivas, e as modificações do projecto. No fim do procedimento, pode ser obtido um relatório FMEA, e

as modificações recomendadas são implementadas com o objectivo de reduzir para o mínimo o número de potenciais modos de falha.

O trabalho de equipa é crítico para o sucesso da metodologia FMEA, e deve incluir clientes, engenheiros da produção, engenheiros de teste, engenheiros de qualidade, engenheiros de fiabilidade, engenheiros do produto e engenheiros comerciais. A lista dos potenciais modos de falha apresentados no relatório FMEA incluem as falhas de diferentes níveis de clientes internos e externos. A informação utilizada na metodologia FMEA deve ter origem nas linhas de produção, do cliente e de dados de produtos semelhantes. Logo, a equipa FMEA tem que trabalhar com os clientes de forma a adquirir informação necessária para o desenvolvimento de um relatório FMEA.

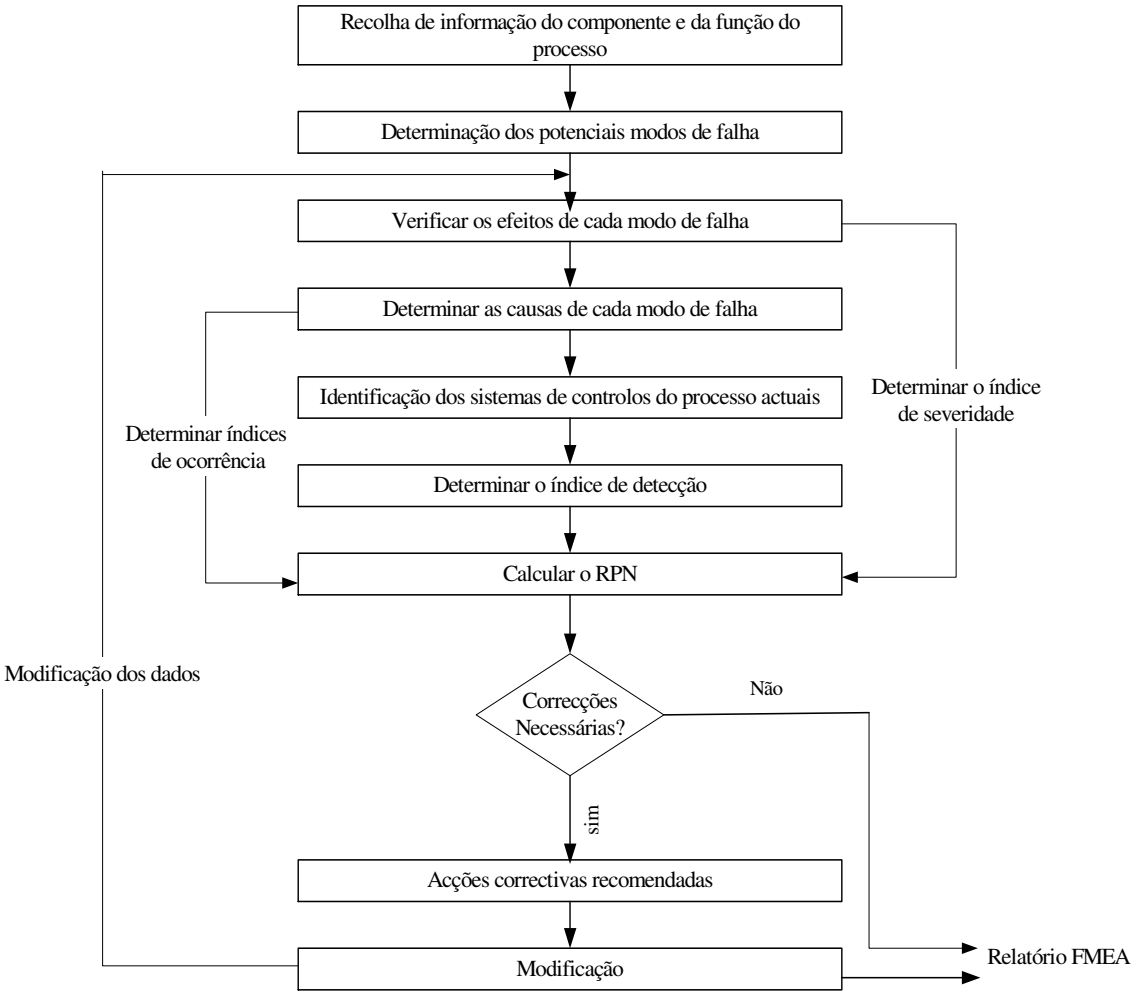


Figura 2. 1 - Procedimento geral da metodologia FMEA

Para desenvolver uma análise FMEA efectiva, são necessários diferentes tipos de informação. A informação necessária à análise FMEA relacionada com o projecto envolve, diagramas de blocos funcionais, desenhos de componentes, descrição do processo, especificações comerciais/cliente/empresa/militares relevantes, dados de fiabilidade, dados de serviço, efeitos ambientais no componente em análise, dados de configuração, especificações de funcionamento e limites, e especificações de interface.

No quadro 2.1 apresentam-se alguns factores relevantes da análise:

Quadro 2. 1 - Factores relevantes da análise FMEA

Factores	Fonte
Modos de falha Causas Taxas de avaria	Dados do Fabricante Dados provenientes da experiência
Efeitos da falha	Engenharia do projecto Fiabilidade Segurança
Identificação dos componentes	Listagem de componentes
Métodos de detecção da falha	Engenharia do projecto Equipa de manutenção
Função	Requisitos do cliente Projecto
Probabilidade de falha Classificação da severidade	Segurança
Nomenclatura Especificações funcionais	Listagem de componentes Equipa de projecto
Missão Modo de funcionamento	Equipa de projecto

O quadro 2.2 demonstra um exemplo real adoptado por *Wei et al* (2001) a uma empresa produtora de semicondutores de Taiwan, o maior produtor de *chips* a nível mundial, aplicando um FMEA tradicional à inserção de componentes de PCB (*Printed circuit board*) para um sistema de controlo automóvel.

Quadro 2. 2 - Processo FMEA tradicional

Função do item	Potencial modo de falha	Potenciais efeitos	Potenciais causas	S_f	S_d	S	RPN	Prioridade
Inserção PCB	Falha na inserção de componentes devido a distracção ("descuido")	Falha no módulo	Operador sem experiência (**A**)	7	1	5	35	6
			Falta de iluminação (**B**)	8	2	8	128	3
		Não funciona	Componentes indisponíveis (**C**)	8	2	6	96	5
			Componentes avariados (**D**)	7	3	5	105	4
	Inserção incompleta	Falha no módulo	Erro do operador (**E**)	7	6	4	168	2
		Motor queima	PCB avariado (**F**)	10	4	5	200	1

onde: S_f - Representa a probabilidade de ocorrência, numa escala de 1 a 10.

S_d- Representa a probabilidade de não detecção, numa escala de 1 a 10, sendo utilizado para medir a possibilidade de que, quando os problemas ocorrerem o sistema de detecção consiga detectá-los.

S- Representa a severidade da falha para os clientes ou para os processos seguintes, numa escala de 1 a 10. Uma vez que a causa F tem o maior valor de RPN, deve ser a primeira a ser melhorada.

Os dois parâmetros probabilísticos (ocorrência e não detecção) e o parâmetro severidade são quantificados e combinados para se obter um valor que permita quantificar o valor do risco e assim ser possível ordenar as falhas por ordem decrescente de risco. A medida do risco, Número de Risco Prioritário (RPN) também é útil na quantificação da diminuição do risco após aplicação de medidas preventivas, nos casos mais críticos.

A quantificação dos parâmetros referentes à ocorrência, detecção e severidade das falhas pode ser feita com base numa escala de 10 pontos, onde o valor 10 traduz uma elevada possibilidade de ocorrência de determinada falha, elevada possibilidade desta falha chegar ao cliente sem que seja detectada, e ter um efeito de elevada severidade.

Os quadros 2.3 a 2.5 apresentam escalas de índices de ocorrência, detecção e severidade tipo:

Quadro 2. 3 - Possibilidade de ocorrência de uma falha

Ocorrência da falha	Valor	Taxa de ocorrência das falhas
Possibilidade remota de falha	1	0
Baixa possibilidade de ocorrência de falhas	2	1/20 000
	3	1/10 000
Possibilidade de ocorrência de falhas moderada	4	1/2 000
	5	1/1 000
	6	1/200
Possibilidade de ocorrência de falhas elevada	7	1/100
	8	1/20
Possibilidade de ocorrência de falhas muito elevada	9	1/10
	10	1/2

Quadro 2. 4 - Possibilidade da falha chegar ao cliente

Possibilidade de não detecção da falha	Valor	Probabilidade de um defeito chegar ao cliente
Remota	1	0 – 5%
Baixa	2	6 – 15%
	3	16 – 25%
Moderada	4	26 – 35%
	5	36 – 45%
	6	46 – 55%
Alta	7	56 – 65%
	8	66 – 75%
Muito Alta	9	76 – 85%
	10	86 – 100%

Quadro 2. 5 - Severidade da Falha

Severidade	Valor
O cliente não detecta a falha	1
O cliente detecta ligeiramente a falha	2; 3
Insatisfação do cliente	4; 5; 6
Elevado grau de insatisfação do cliente	7; 8
Consequências de segurança e regulamentares	9; 10

Existem razões distintas que levam uma empresa a investir em recursos humanos e esforços para desenvolver o relatório FMEA. *Dale* e *Shaw* (1990) desenvolveram um trabalho de investigação para determinar as razões pelas quais as empresas fornecedoras da *Ford Motor Company's British* implementaram o FMEA. As razões encontradas são as exigências do cliente, a melhoria da qualidade e da fiabilidade do produto, a melhoria do produto ou processo, assuntos relacionados com compromissos da produção, segurança e diminuição de reclamações e accionamentos de garantia. No entanto, a principal razão da maioria destas empresas para a implementação do FMEA é a exigência por parte dos clientes. Muitas companhias terminam a metodologia FMEA quando o relatório FMEA é concluído.

Os problemas associados à implementação do FMEA inclui o tempo do processo FMEA na etapa de projecto do produto/processo, o estabelecimento de uma equipa equilibrada e com a formação adequada, a coordenação de cada departamento, a produção de um relatório FMEA preciso, e a concordância de todos os departamentos relativamente ao relatório FMEA, que visa a melhoria do projecto do produto ou processo.

2.4.1 - Definição do sistema e dos requisitos necessários

Consiste na definição do sistema a considerar, e a definição envolve a decomposição do sistema em blocos, blocos funcionais e a sua ligação entre eles. Normalmente, no início do programa, não existe uma boa definição do sistema, e o analista tem que desenvolver a sua própria definição do sistema, utilizando documentos como por exemplo relatórios oficiais, desenhos/diagramas, planos de desenvolvimento e especificações.

2.4.2 - Estabelecimento de Princípios Básicos

Estes princípios são estabelecidos da forma como se pretende conduzir a análise FMEA. Normalmente, o desenvolvimento dos princípios básicos é um processo muito claro, quando a definição do sistema e os requisitos do sistema estão completamente definidos. Todavia, temos exemplos de princípios básicos que incluem declarações de objectivos primárias e secundárias, limites ambientais e operacionais, declarações relativas ao nível de análise, delineação das fases de trabalho, definição do que constitui falha do sistema e especificações do código do sistema utilizado.

2.4.3 - Descrição do Sistema e dos Blocos Funcionais Associados

Este ponto refere-se à preparação da descrição do sistema em análise. Esta descrição pode ser dividida em 2 partes:

Descrição Narrativa: Esta descrição é preparada para cada subsistema e componente, assim como para todo o sistema, fornecendo a descrição de cada operação do componente, em cada fase da operação. O grau de detalhe da descrição depende de factores como, a aplicação do componente e da singularidade das funções desenvolvidas.

Diagrama de Blocos: O objectivo do diagrama de blocos é determinar o sucesso ou a falha das relações entre todos os componentes do sistema. Todos os componentes do sistema submetidos a análise, assim como as relações em série ou redundância entre os componentes são apresentados graficamente, e todas as entradas e saídas do sistema e em particular de cada elemento do sistema estão identificadas.

2.4.4 - Identificação dos modos de falha e seus efeitos associados

Este ponto está relacionado com a execução da análise dos modos de falha e seus efeitos. É utilizada uma tabela conforme a que a seguir se apresenta de forma a assegurar uma cobertura sistemática de todos os modos de falha. Apesar de todos os termos utilizados na tabela serem explícitos e facilmente compreendidos, os termos "Medidas de Compensação" (*Compensating provisions*) e "Classificação da Criticidade" são explicados em pormenor.

Medidas de Compensação – Medidas, como sejam, alternativas de projecto ou acções do operador, envolvendo a mitigação dos efeitos das falhas ou da envolvente devem ser identificadas e avaliadas.

Classificação da Severidade – Está relacionada com a categorização do potencial efeito da falha. Por exemplo, pode haver perdas de vidas humanas devido a falhas, pode haver perda de produção devido a falhas, pode haver atrasos devido a falhas e também pode não haver efeito das falhas.

O quadro 2.6 representa um modelo tipo de uma análise FMEA.

Quadro 2. 6 - *Layout* típico de uma análise FMEA tradicional

Sistema: Subsistema: Desenho/Diagrama:		**Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos**							Analista: Data: Página: Aprovado por:		
Identificação do Componente	Função do Componente	Modos de Falha e Causas	Fase do Processo/ Modo de Funcionamento	Efeito da Falha				Método de Detecção	Medidas de Compensação	Classificação da Criticidade	Recomendações
				Sistema	Subsistema	Processo	Pessoal				

2.4.5 - Preparação de uma listagem dos componentes

A listagem dos componentes críticos é compilada de forma a facilitar a comunicação de resultados importantes entre a análise e a gestão, e deve conter a identificação do componente, os principais modos de falha, as suas consequências, a criticidade e o número do FMEA onde se encontra. A lista tipo de componentes críticos é apresentada no quadro 2.7:

Quadro 2. 7 - Lista típica de componentes críticos

Listagem dos Componentes Críticos				
Identificação do componente	**Descrição do Modo de Falha**	**Efeito da Falha**	**Classificação da Criticidade**	**Número FMEA**

2.5 - Avaliação da Criticidade

Segundo *Dhillon* (1999) o objectivo da avaliação da criticidade é ordenar os modos de falha, detectados durante a análise do sistema baseando-se nos seus efeitos e na sua probabilidade de ocorrência, de acordo com a sua criticidade. Para elaborar uma avaliação da severidade da falha de um item utilizam-se dois métodos comuns, o Número de Risco Prioritário (RPN) e o método descrito nas Normas Militares MIL-STD-1629. O RPN é largamente utilizado na indústria automóvel, ao passo que as Normas Militares MIL-STD-1629 são mais utilizadas na Indústria Nuclear, Aeroespacial e Defesa.

2.5.1 – Técnica RPN

Utilizando a técnica do RPN, calcula-se o número de risco prioritário de um modo de falha, utilizando 3 índices:

- Severidade do efeito da falha (**S**)
- Probabilidade de ocorrência de um modo de falha (**O)**
- Probabilidade de detecção da falha (**D**)

Mais especificamente, o RPN é calculado através da multiplicação dos três índices anteriores. Então, matematicamente o RPN é expresso por:

$$RPN = S \times D \times O \qquad \textbf{(Eq. 2. 1)}$$

As avaliações preliminares FMEA, podem não ter definidos todos estes aspectos na fase inicial do projecto, no entanto é expectável que os índices de severidade fiquem completos durante a fase de projecto.

O quadro 2.8 traduz uma das possíveis interpretações do valor do RPN.

Quadro 2. 8 - Possível interpretação dos valores de RPN

RPN	Comentários
1<RPN <18	Risco Baixo
18 <RPN <64	Risco Moderado. Requer validação selectiva do produto e avaliação e caracterização do produto ou processo de forma a reduzir o valor do RPN.
64 <RPN	Risco Elevado. Requer uma extensa revisão do projecto ou processo de forma a reduzir o RPN.

Os modos de falha com elevado RPN são considerados mais críticos, logo, a estes é atribuída uma prioridade superior, comparativamente com modos de falha com menor valor de RPN. Todavia, os índices e a sua interpretação podem variar de organização para organização. Os quadros 2.9 a 2.11 apresentam índices de detecção de falha, probabilidade de ocorrência de determinado modo de falha, e a severidade provocada pelo efeito da falha, de uma determinada organização.

Capacidade de Detecção (D): O critério de detecção recomendado é baseado na capacidade do sistema detectar um determinado modo de falha. A equipa FMEA pode alterar os critérios de detecção (quadro 2.9).

Quadro 2. 9 - Exemplo dos índices de probabilidade de detecção

Detecção	Descrição	Índice
Não Detectável	O sistema não detecta um determinado modo de falha, ou não tem forma de o evidenciar	10
Muito Baixo	O sistema de detecção não irá detectar um determinado modo de falha	9
Baixo	Não é provável que o sistema de detecção detecte determinado modo de falha	8 7
Moderado	O sistema de detecção poderá detectar um determinado modo de falha	6 5
Elevado	O sistema de detecção provavelmente irá detectar um potencial modo de falha	4 3
Muito Elevado	O sistema de detecção irá detectar um determinado modo de falha	2 1

Probabilidade de Ocorrência (O): A equipa FMEA pode alterar este critério. A taxa de falhas pode ser expressa como falha por unidade de tempo (milhões de horas) ou como uma probabilidade (quadro 2.10).

Quadro 2. 10 - Exemplo dos índices de probabilidade de ocorrência

Taxa de Falhas	Forma de Ocorrência da Falha	Índice	Ocorrência por unidade de tempo	
Muito Alta	Falha é praticamente inevitável	10	1/2	50%
		9	1/3	33%
Alta	Falhas repetitivas	8	1/8	12,5%
		7	1/20	5%
Moderada	Falhas ocasionais	6	1/80	1,25%
		5	1/400	0,25%
		4	1/2 000	0,05%
Baixa	Número de falhas reduzido	3	1/1 500	666ppm
		2	1/150 000	6,66ppm
Remota	Falha improvável	1	1/1 500 000	0,66ppm

ppm – partes por milhão

Severidade (S): Se a severidade for classificada com um valor 10, os trabalhadores da área do desenvolvimento devem empenhar-se para reduzir e diminuir o índice de severidade. A identificação inicial de índices de severidade elevados irá prevenir que estes produtos cheguem aos utilizadores finais, para isso deve-se adoptar acções correctivas para reduzir o índice de severidade e desenvolver acções que minimizem o índice de severidade (quadro 2.11).

Quadro 2. 11 – Exemplo do índice de severidade

Severidade	Descrição	Índice
Muito Elevada	Indica um potencial modo de falha que pode causar a morte, sem aviso	10
	Indica um potencial modo de falha que pode causar a morte, com aviso	9
Elevada	Insatisfação elevada do cliente, devido à natureza da falha, como por exemplo o motor de um automóvel, em que a função do sistema principal não funciona	8

Quadro 2. 11 - Exemplo do índice de severidade (cont.)

Severidade	Descrição	Índice
Elevada a Moderada	Inoperacionalidade de uma função importante, mas que não envolve aspectos de segurança. Por exemplo, o sistema de ar condicionado	7
Moderada	Falhas causam alguma insatisfação no cliente	6
Moderada a Baixa	Falha implica desconforto ao cliente, ou o cliente fica incomodado com a falha	5
Baixa	O cliente verifica alguma deterioração de alguns subsistemas ou deterioração do rendimento do equipamento	4
Baixa a Reduzida	A natureza da falha causa apenas um ligeiro incómodo. O cliente provavelmente notará apenas uma ligeira deterioração do rendimento	3
Reduzida	Não é expectável que a natureza deste tipo de falhas possa causar algum efeito real no rendimento/performance do sistema	2
Muito Reduzida	A maioria dos clientes não se apercebe de falhas desta natureza	1

2.5.2 – Normas Militares (MIL-STD-1629)

Esta técnica é muitas vezes utilizada na indústria aeroespacial, defesa e nuclear para ordenar por ordem de prioridade os modos de falha de um componente, para que possam ser tomadas medidas correctivas apropriadas. A técnica requer a categorização da severidade do efeito do modo de falha e depois o desenvolvimento de um "*ranking*" crítico. O quadro 2.12 apresenta a classificação da severidade dos efeitos dos modos de falha.

Quadro 2. 12 – Exemplo do índice de severidade para a MIL-STD-1629

Classificação	Descrição	Índice
Catastrófica	A ocorrência da falha pode resultar na morte ou perda de equipamento.	A
Crítica	A ocorrência da falha pode resultar em danos sérios na propriedade, ferimentos severos, danos sérios no sistema podendo levar à perda da missão	B

Quadro 2. 12 - Exemplo do índice de severidade para a MIL-STD-1629 (cont.)

Classificação	Descrição	Índice
Marginal	A ocorrência da falha pode resultar em danos na propriedade, ferimentos e danos no sistema	C
Reduzida	A falha não é suficientemente séria para levar à existência de ferimentos, danos no sistema ou danos na propriedade, mas resultará numa reparação ou manutenção não planeada	D

Segundo as normas militares MIL-STD-1629, a análise de criticidade tem como objectivo "ordenar" os potenciais modos de falha identificados, de acordo com a combinação dos factores severidade e probabilidade de ocorrência. O factor probabilidade de ocorrência pode ser obtido a partir de uma análise quantitativa ou qualitativa. A disponibilidade dos dados relativos às especificações dos componentes e da sua taxa de avarias vão influenciar a escolha da análise quantitativa ou qualitativa. A análise qualitativa é adequada quando não estão disponíveis os dados referentes à taxa de avarias. Neste tipo de análise, as probabilidades de ocorrência individuais de falha devem ser agrupadas em diferentes níveis lógicos pré-definidos, que estabelecem os níveis de probabilidade de falha qualitativos. Os níveis de probabilidade de ocorrência são definidos de acordo com o quadro seguinte:

Quadro 2. 13 – Níveis de probabilidade de ocorrência(MIL-STD-1626)

Nível de Probabilidade	Designação	Descrição
I	Frequente	Probabilidade elevada de ocorrência de falha, durante o tempo de utilização do item. Probabilidade elevada pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de uma única falha maior que 0,20 da probabilidade de ocorrência de falha total, durante o tempo de utilização do item.
II	Moderado	Probabilidade de ocorrência de falha moderada, durante o tempo de utilização do item. Probabilidade elevada pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de uma única falha maior que 0,10 e menor que 0,20 da probabilidade de ocorrência de falha total, durante o tempo de utilização do item.

Quadro 2. 13 - Níveis de probabilidade de ocorrência(MIL-STD-1626) (cont.)

Nível de Probabilidade	Designação	Descrição
III	Ocasional	Probabilidade de ocorrência de falha ocasional, durante o tempo de utilização do item. Probabilidade elevada pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de uma única falha maior que 0,01 e menor que 0,10 da probabilidade de ocorrência de falha total, durante o tempo de utilização do item.
IV	Remota	Probabilidade de ocorrência de falha remota, durante o tempo de utilização do item. Probabilidade elevada pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de uma única falha maior que 0,001 e menor que 0,01 da probabilidade de ocorrência de falha total, durante o tempo de utilização do item.
V	Extremamente Improvável	Um modo de falha que tenha uma probabilidade de ocorrência praticamente nula durante o tempo de utilização do item, pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de um único modo de falha menor que 0,001 da probabilidade de ocorrência de falha total, durante o tempo de utilização do item.

A análise quantitativa é utilizada quando se têm disponíveis os dados relativos dos modos de falha e sua probabilidade de ocorrência. Nesta análise, é construída um quadro de Análise de Criticidade (CA), onde consta a seguinte informação:

- Número de identificação;
- Identificação do item/função;
- Função;
- Modos de falha e causas;
- Fase da missão/Modo operacional;
- Classificação da severidade;

- Taxa de avarias – Quando os dados são avaliados em termos de probabilidade de ocorrência, deve-se indicar o nível de probabilidade de ocorrência. Deve apresentar-se a fonte dos dados referentes à taxa de avarias.
- Probabilidade do efeito da falha (β) – Os valores de β representam a probabilidade condicional de que o efeito da falha resulte na classificação da criticidade identificada, dado que o modo de falha ocorra. Este valor representa a decisão do analista de como a probabilidade condicional de ocorrência de perda seja quantificada de acordo com o quadro 2.14:

Quadro 2. 14 - Probabilidade do efeito da falha

Efeito da Falha	Valor de β
Perda Actual	1,00
Perda Provável	$0{,}10 < \beta \leq 1{,}00$
Perda Possível	$0 < \beta \leq 0{,}10$
Sem Efeito	0

- Razão do modo de falha (α) – É a probabilidade expressa como a fracção decimal que um item irá falhar no modo de falha identificado. Se todos os modos de falha de um item forem identificados, o somatório dos valores de α representam a decisão do analista em função da análise das funções dos itens.
- Taxa de falhas de um item (λ_p) – Taxa de falhas de um item determinada a partir da predição da fiabilidade.
- Tempo de funcionamento (t) – Tempo de funcionamento, em horas ou número de ciclos de funcionamento, do item por missão.
- Número crítico do modo de falha (C_m) – O valor do C_m é uma parte do número crítico de um item devido a um dos modos de falha sob a classificação da severidade. A expressão que permite calcular o C_m é:

$$C_m = \beta \times \alpha \times \lambda_p \times t \qquad \textbf{(Eq. 2. 2)}$$

onde: C_m – Número crítico de falha

β – Probabilidade do efeito de falha

α – Razão do modo de falha

λ_p – Taxa de falha de um item

t – Tempo de funcionamento

– Número crítico do item (C_R) – É o número de falhas previstas de um sistema devido aos modos de falha de um item. O tipo específico de falhas do sistema é expresso pela classificação da severidade do modo de falha do item. O C_R de um item é o somatório dos números críticos dos modos de falha (C_m) e pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$C_R = \sum_{n-1}^{j} (\beta \times \alpha \times \lambda_p \times t)_n \qquad \textbf{(Eq. 2. 3)}$$

onde: C_R – Número crítico do item

n – Modos de falha de um item que estão incluídos numa classificação de criticidade

j – Último modo de falha do item que se encontra na classificação de criticidade

Matriz de Criticidade – Esta matriz fornece um meio de identificar e comparar cada modo de falha, relativamente aos restantes modos de falha e à severidade. A matriz é construída inserindo o número de identificação do item ou do modo de falha no local da matriz que representa a categoria da severidade e o nível de probabilidade de ocorrência, ou o número crítico (C_R) dos modos de falha do item. O resultado da matriz apresenta a distribuição da criticidade dos modos de falha dos itens e fornece uma ferramenta para a identificação de acções correctivas prioritárias (figura 2.2).

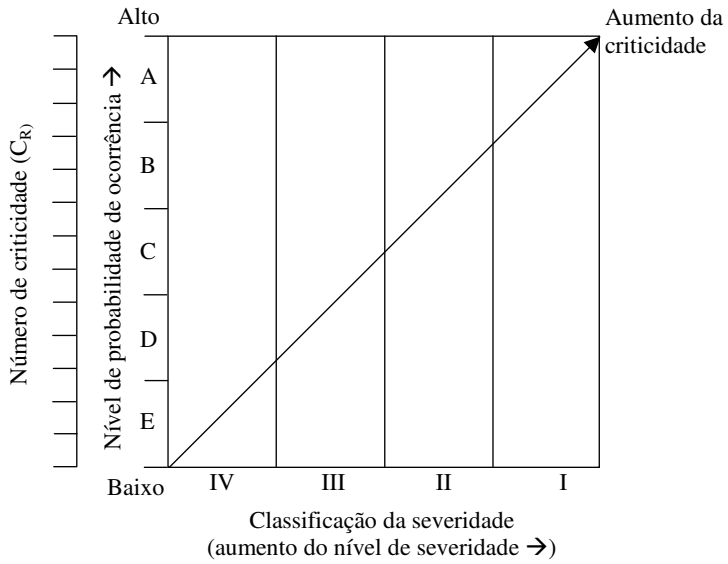


Figura 2. 2 - Matriz de Criticidade

Ao longo da linha diagonal, quanto mais longe da origem do gráfico, maior a criticidade e mais urgente a necessidade de implementação de medidas correctivas.

2.6 – Críticas à análise FMEA

Segundo *Teng* e *Ho* (1996) a análise de falhas e seus efeitos (FMEA) é uma ferramenta muito útil para a melhoria do projecto do produto e do planeamento do processo, através da detecção de potenciais falhas no produto ou processo de forma a ser possível tomar medidas preventivas. Contudo, os autores *Gilchrist* (1993) e *Ben-Daya and Raouf* (1996), apresentaram alguns incovenientes relacionados com esta metodologia, especialmente o modo de determinação do número de risco prioritário (RPN) através da multiplicação dos três índices predefinidos (Ocorrência, Detecção e Severidade), sem que seja considerada a sua importância relativa. A discussão deste assunto, inclui:

- A avaliação do RPN é diferente dos conceitos tradicionais de medidas de qualidade;
- A pontuação atribuída aos índices é linear para a probabilidade de falha, mas não é linear para a probabilidade de não detecção;
- Diferentes combinações dos 3 índices podem produzir exactamente o mesmo valor de RPN, mas, as implicações ocultadas podem ser completamente diferentes;
- Porque razão se utiliza a multiplicação dos índices em vez de outras formulações;

- O valor do RPN ignora o efeito da quantidade de produção;
- O RPN não satisfaz os requisitos comuns de cálculo;
- O RPN deve quantificar a probabilidade de um cliente receber uma peça com defeito.

Gilchrist (1993) modificou o FMEA tradicional, combinando o custo de falha para construir um modelo esperado de custos, mas, devido à dificuldade de estimativa das probabilidades de ocorrência de falha e de detecção da falha este modelo, segundo o autor, raramente é utilizado pela indústria.

Ben-Daya e *Raouf* (1996) consideraram que a avaliação dos 3 índices (Ocorrência, Detecção e Severidade), utilizando uma escala de 1 a 9, não é adequada e que a atribuição de igual importância aos 3 índices não traduz a realidade. Estes autores concluíram que, a probabilidade de ocorrência da falha deve ser mais importante do que a probabilidade de não detecção da falha e propuseram uma nova formulação para a probabilidade de ocorrência da falha, considerando o factor probabilidade de detecção da falha como o expoente de base 2.

Quadro 2. 15 - FMEA modificado por *Ben-Daya* e *Raouf* (1996)

Função do Item	Potenciais Modos de Falha	Potenciais Efeitos	Potenciais Causas	S_f	S_d	S	RPN	Prioridade
A	Modo **A**	Efeito **A**	Causa **A**	2^7	5	4	2 560	4
			Causa **B**	2^9	10	4	20 480	1
			Causa **C**	2^4	4	4	256	5
	Modo **B**	Efeito **B**	Causa **D**	2^8	7	8	14 336	2
			Causa **E**	2^7	4	8	4 076	3

Pode-se observar que a causa B é o principal causa a ser melhorada.

Wei, *Liang* e *Liu* (2001) propõem uma metodologia racional no cálculo do número de risco prioritário, considerando que a teoria *Grey*[6] pode avaliar potenciais problemas de uma forma simples e clara.

[6] Segundo os autores, a teoria *grey* é aplicada a decisões caracterizadas por informação incompleta e estuda o comportamento de sistemas utilizando uma análise relacional e a construção de modelos. Esta teoria fornece uma forma de quantificar/medir/analisar relações entre séries de dados discretos quantitativos e qualitativos, em que todos os componentes das séries devem ter as seguintes características: existência, contáveis, extensíveis e independentes.

2.7 – Adaptação da metodologia FMEA ao trabalho desenvolvido

No presente trabalho, devido à inexistência de dados relativos às taxas de avaria dos componentes, adoptaram-se 4 classes de probabilidade de ocorrência e 4 classes de severidade, que se definem do seguinte modo:

Quadro 2. 16 - Probabilidade de ocorrência da falha

Classe	Probabilidade de Ocorrência
A	Impossível
B	Muito improvável
C	Improvável
D	Possível

Quadro 2. 17 – Grau de Severidade

Classe	Severidade
1	Sem influência
2	Pouco crítico
3	Crítico
4	Muito crítico

Na atribuição da classe de probabilidade de ocorrência de determinada falha, optou-se por distinguir 3 fases distintas de utilização da instalação, nomeadamente a fase de montagem (M), a fase de funcionamento (F) e a fase de manutenção ou alterações (Mn), pelo que foi atribuído um índice a cada classe de probabilidade de ocorrência, de acordo com o quadro 2.18:

Quadro 2. 18- Probabilidade de ocorrência da falha, adaptado

Classe	Probabilidade de Ocorrência
A_M; A_F; A_{Mn}	Impossível
B_M; B_F; B_{Mn}	Muito improvável
C_M; C_F; C_{Mn}	Improvável
D_M; D_F; D_{Mn}	Possível

Da mesma forma, para o grau de severidade também foram considerados dois pontos de vista de severidade, nomeadamente segurança (S) e desempenho do sistema (D), adaptando-se o quadro 2.17.

Quadro 2.19 – Grau de Severidade, adaptado

Classe	Severidade
1_S; 1_D	Sem influência
2_S; 2_D	Pouco crítico
3_S; 3_D	Crítico
4_S; 4_D	Muito crítico

Da conjugação dos quadros 2.18 e 2.19 construiu-se o seguinte quadro de criticidade de duas entradas, onde na zona sombreada se situam os acontecimentos críticos.

Quadro 2.20 – Quadro de Criticidade

Probabilidade de ocorrência / Grau de severidade	A_M; A_F; A_{Mn}	B_M; B_F; B_{Mn}	C_M; C_F; C_{Mn}	D_M; D_F; D_{Mn}
1_S; 1_D				
2_S; 2_D				
3_S; 3_D				
4_S; 4_D				

Neste capítulo foram apresentados 3 tipos de FMEA, nomeadamente FMEA do projecto, FMEA do processo e FMEA de componentes. Foram também apresentados os passos para o desenvolvimento de uma análise FMEA que são:

1- Definição do sistema e dos principais requisitos;

2- Estabelecimento de princípios básicos;

3- Descrição do sistema e dos blocos funcionais associados;

4- Identificação dos modos de falha e seus efeitos associados;

5- Preparação de uma listagem de componentes.

No fim do capítulo foi proposta uma metodologia adaptada à análise FMEA da Coluna de Destilação do Laboratório de Tecnologia Química do ISEL.

PÁGINA EM BRANCO

CAPÍTULO 3

Introdução à Operação Unitária Destilação

PÁGINA EM BRANCO

No capítulo 3 pretende-se introduzir noções fundamentais da operação unitária realizada na Coluna de Destilação do Laboratório de Tecnologia Química do ISEL, a Destilação.

3.1 - Definição de Destilação

A destilação é uma operação unitária muito antiga, sendo utilizada há centenas de anos. As primeiras aplicações utilizaram a vaporização do crude e equipamento de condensação para concentrar o teor alcoólico de bebidas. A primeira coluna de destilação contínua vertical foi desenvolvida por *Cellier-Blumenthal* em França no ano 1813. *Perrier*, introduziu no ano 1820, em Inglaterra, uma versão prematura de uma coluna de pratos de campânulas. Os enchimentos começaram a ser utilizados no início de 1820 por *Clement*, que utilizava como enchimento bolas de vidro para destilar álcool. *Coffey* desenvolveu em 1830 a primeira coluna de pratos perfurados.

Durante os primeiros 25 anos do século XX, a aplicação da destilação foi estendida além das actividades de elevação do teor alcoólico de bebidas, sendo a primeira técnica de separação utilizada na indústria química. A expansão da sua utilização foi acelerada quando a destilação foi reconhecida como um meio para separar o crude em vários produtos. A partir daqui, a aplicação da destilação propagou-se à maioria dos processos químicos.

A Operação Unitária **Destilação** é definida como sendo um processo em que, uma mistura líquida ou de vapor de duas ou mais substâncias é separada nos seus constituintes com um determinado grau de pureza, por aplicação ou remoção de calor. Por outras palavras, a destilação separa substâncias através da diferente facilidade com que cada uma vaporiza.

A **destilação** é baseada no facto, do vapor de uma mistura em ebulição ser mais rico no componente de menor ponto de ebulição. Quando o vapor é arrefecido e condensado, o produto condensado contém maior quantidade de componentes voláteis, e o resíduo terá maior quantidade de componentes menos voláteis.

Apesar da maioria das pessoas ter uma breve noção do conceito de destilação, por vezes são menosprezados aspectos muito importantes, tais como:

- A destilação é o processo de separação mais utilizado na indústria;
- É um processo que requer grandes quantidades de energia quer em termos de aquecimento, quer em termos de arrefecimento;
- Pode atingir os 50% dos custos de operação de uma unidade industrial.

O melhor método para a redução dos custos de operação de unidades de destilação é melhorar a eficiência e fazer uma optimização e controlo do processo.

3.2 - Classificação de Colunas de Destilação

Existem muitos tipos de colunas de destilação, desenvolvidas de forma a atingir-se um determinado grau de separação. Cada tipo de coluna difere, também, em termos de complexidade.

A classificação da destilação pode ser feita com base:

- No equipamento utilizado: pratos ou enchimento
- Na configuração do processo: destilação, destilação azeotrópica, destilação extractiva, destilação complexa e destilação reactiva
- No tipo de processo: refinação, petroquímica, química, tratamento de gás
- No seu modo de funcionamento: As colunas de destilação podem funcionar de modo contínuo ou descontínuo. Numa operação em descontínuo, a alimentação é feita periodicamente, ou seja, a coluna é carregada e o processo de destilação inicia-se. Quando se atinge o grau de separação pretendido, uma nova carga de alimentação é introduzida na coluna. Num processo em contínuo, a alimentação é feita em contínuo, não havendo interrupções. A menos que, ocorra um problema na coluna ou noutra unidade processual que interfira com a coluna.
- Características da Alimentação: Podemos ter uma Coluna Binária, quando a alimentação contém apenas dois componentes, ou, podemos ter uma Coluna Multi-Componente quando a alimentação contém mais do que dois componentes.
- Número de Produtos Obtidos: Numa Destilação Binária a alimentação será separada apenas num produto de topo (destilado) e num produto de fundo (resíduo). Numa Destilação Multi-componente pode haver várias saídas de produto ao longo da coluna. Por exemplo, no caso do petróleo, constituído por diversos Hidrocarbonetos com pontos de ebulição diferentes, este é separado nos seus constituintes por ordem crescente do ponto de ebulição. Os Hidrocarbonetos com menor ponto de ebulição são condensados e recolhidos num nível mais alto da coluna, ao passo que os hidrocarbonetos com maior ponto de ebulição serão condensados e recolhidos na base da coluna.

- Quando existe uma alimentação suplementar que irá "ajudar" a separação, temos uma Destilação Extractiva se a alimentação suplementar remover o resíduo. Se a alimentação suplementar eliminar o destilado designa-se por Destilação Azeotrópica.

3.3 - Equipamento básico de destilação

Segundo *Kister* (1990) as colunas de destilação envolvem componentes que são utilizados para promover a transferência de calor ou a transferência de massa. Uma unidade típica de destilação é composta por:

- Uma coluna, onde se processa a separação dos componentes;
- Interior da coluna, pratos ou enchimento, para promover a separação dos componentes;
- Ebulidor, que fornece a energia necessária à vaporização da mistura;
- Condensador, para arrefecer e condensar o vapor que deixa o topo da coluna;
- Tanque de refluxo, para a recolha do produto condensado,

A coluna juntamente com os pratos ou enchimento, o ebulidor e o condensador constitui a designada Coluna de Destilação.

3.3.1 - Colunas de Pratos

Designa-se por Coluna de Pratos, quando pratos de diversos tipos são utilizados para a retenção do líquido de forma a favorecer o contacto entre o vapor e o líquido e assim melhorar o grau de separação.

Existem muitos tipos de pratos como por exemplo pratos campânulas, pratos de válvulas, pratos perfurados, etc. O prato funciona como se tratasse de uma mini-coluna, onde é realizada uma parte da separação. Pode-se então deduzir que, quantos mais pratos possuir a coluna melhor é o grau de separação. Logo, a eficiência da separação depende significativamente do tipo e do número de pratos.

Os pratos são projectados de forma a maximizar o contacto líquido-vapor, tendo em consideração a distribuição do líquido e a distribuição do vapor no prato. Pois, quanto melhor o contacto líquido-vapor, maior a eficiência no prato, significando um melhor desempenho da coluna. A escolha de pratos adequados, pode significar um menor número de pratos para o mesmo grau de separação pretendido, tendo a vantagem de reduzir os custos de funcionamento

e construção. Existe uma grande tendência para a substituição de pratos por enchimento, de forma a aumentar a eficiência da separação.

3.3.2 - Colunas de Enchimento

O enchimento é um componente passivo, que tem o papel de aumentar a área interfacial do contacto líquido-vapor. As partículas do enchimento, quando colocadas na coluna, promovem um bom contacto líquido-vapor, sem que causem uma elevada queda de pressão, que impeça a ascensão do vapor ao longo da coluna.

As colunas de enchimento são designadas por colunas de contacto contínuo, enquanto as colunas de pratos são designadas por colunas de contacto por etapas, devido à forma como é feito o contacto líquido-vapor.

Os enchimentos, são normalmente divididos em três classes:

1. Enchimento Aleatório, constituído por partículas de enchimento com uma forma geométrica específica. São vazados ou empilhadas do interior das colunas.
2. Enchimento Estruturado, enchimento de forma definida, constituído por camadas de malha de rede metálica enrugada ou por folhas enrugadas. As secções deste tipo de enchimento são empilhadas no interior da coluna.
3. Enchimento em Rede, este tipo de enchimento também tem forma definida, mas, em vez de se tratar de folhas enrugadas, trata-se de uma estrutura em forma de rede.

Os enchimentos aleatórios são a forma mais barata e o tipo de enchimento mais utilizado. Embora muitas vezes formem um material com boa resistência à corrosão, não são tão eficientes como o enchimento estruturado, relativamente à superfície efectiva de transferência de massa e calor. O enchimento deve ter uma dimensão tão uniforme quanto possível, de forma a originar um leito com características uniformes, e com a porosidade pretendida.

Historicamente existem três gerações de enchimento aleatório. A primeira geração (1907 a 1950) produziu dois tipos básicos de enchimento aleatório, os Anéis de *Raschig* e as Selas de *Berl*, que se tornaram a base dos enchimentos aleatórios actualmente utilizados. Estes enchimentos foram substituídos por enchimentos aleatórios mais modernos e, raramente são utilizados nas unidades de destilação actuais.

A segunda geração, final dos anos 50 e início dos anos 70, produziu dois tipos de enchimento com geometrias muito populares, os Anéis *Pall* que evoluíram dos Anéis de

Raschig e as Selas *Intalox* que evoluíram a partir das Selas de *Berl.* A segunda geração de enchimento, mantém-se actual e continua a utilizar-se nas unidades de destilação.

A terceira geração, meados dos anos 70 até aos dias de hoje, produziu uma grande variedade de enchimentos com formas geométricas variadas, a maioria com origem nas Selas *Intalox* e nos Anéis *Pall*.

A selecção do material de enchimento é acima de tudo baseada na resistência à corrosão.

Enchimentos Aleatórios Metálicos – Os enchimentos de aço carbono são normalmente os preferidos quando se trabalha em ambientes não corrosivos. Comparados com os enchimentos cerâmicos e plásticos, os enchimentos metálicos, oferecem, normalmente, elevada capacidade e eficiência, uma larga gama de geometrias, elevada capacidade de escoamento, é inquebrável e possui elevada resistência à compressão. Os enchimentos em aço inox, custam aproximadamente 3 a 5 vezes mais do que os enchimentos em aço carbono, e os enchimentos de ligas metálicas são ainda mais caros. Geralmente, o aço inox e outros enchimentos metálicos possuem as mesmas vantagens do que o aço carbono à excepção do baixo custo, este tipo de enchimento é utilizado quando estão previstas condições corrosivas.

Enchimentos Aleatórios Cerâmicos – Os enchimentos cerâmicos têm sido cada vez menos utilizados desde que os enchimentos plásticos, de baixo custo, se tornaram disponíveis. Comparativamente com os enchimentos plásticos, os cerâmicos são quebráveis, têm baixa capacidade e não estão disponíveis em todas as formas geométricas. Os enchimentos cerâmicos, são normalmente, específicos para aplicações em que a sua característica inerte e a sua resistência a altas temperaturas são um requisito.

Enchimentos Aleatórios Plásticos – O polipropileno é barato e é o plástico mais utilizado quando as temperaturas não ultrapassam os 121ºC. No caso de se pretender trabalhar a temperaturas superiores, existem plásticos que são mais resistentes à temperatura, no entanto, são mais caros. Geralmente, os anéis de plástico *Pall* são rígidos e resistem mais à deformação devido aos "braços" que possuem no seu interior. A grande desvantagem do plástico, está relacionada com a sua fraca molhabilidade. Enquanto o carácter hidrofílico da cerâmica, e também do metal apesar de menor, promover a formação de uma fina camada de líquido à superfície mesmo a baixos caudais, o efeito hidrofóbico do plástico, torna mais difícil esta formação da camada de líquido á superfície do enchimento. Esta baixa molhabilidade pode causar problemas, particularmente na fase inicial de funcionamento.

O enchimento estruturado, foi introduzido nos meados dos anos 40. Os primeiros enchimentos estruturados, como o *Panapak* nunca se tornaram muito populares, talvez por não ter sido feita uma campanha de marketing agressiva, ou talvez por ter aparecido antes do problema do efeito da mal distribuição de líquido no enchimento estruturado ter sido avaliado. A segunda geração de enchimento estruturado teve início no final dos anos 50 com o enchimento de alta eficiência de "Tela de Arame" como o enchimento *Goodloe*, *Hyperfil* e *Koch-Sulzer*. No início dos anos 70, a utilização deste enchimento aumentou consideravelmente na destilação a vácuo, onde as baixas perdas de pressão por prato teórico são a maior vantagem. O seu elevado custo, elevada sensibilidade aos sólidos e a sua baixa capacidade restringe a sua aplicação à destilação a vácuo.

O enchimento estruturado de folha canelada, inicialmente introduzido pela *Sulzer*, no final dos anos 70, deu início à terceira geração do enchimento estruturado. Com uma elevada capacidade, baixo custo e baixa sensibilidade aos sólidos, mantendo elevada eficiência, este enchimento tornou-se competitivo com os enchimentos tradicionais. Na década de 80, assistiu-se a um acelerado crescimento de popularidade do enchimento estruturado, ao ponto de se ter tornado num dos enchimentos mais utilizados actualmente.

Os enchimentos rede de plástico ou madeira utilizados em colunas de destilação e absorção são semelhantes aos utilizados em torres de arrefecimento. O primeiro enchimento em rede, *Glitsch C*, foi desenvolvido no início dos anos 60. Os enchimentos em rede mais modernos, são desenvolvidos com o objectivo de promover características desejadas, como, elevada área disponível, elevada resistência a incrustações e obstruções e baixa perda de pressão. A eficiência deste tipo de enchimento é consideravelmente menor do que no enchimento aleatório e estruturado.

3.4 - Terminologia

A mistura líquida a ser processada é designada por alimentação, e é introduzida directamente na coluna na fase líquida, líquido saturado, parcialmente vaporizada, vapor saturado ou em fase de vapor sobreaquecido, num prato que tem o nome de prato de alimentação. O prato de alimentação divide a coluna numa zona "superior" (rectificação) e numa zona "inferior" (esgotamento). A alimentação flui ao longo da coluna, sendo depositada na base, no ebulidor, onde é necessário fornecer calor ao ebulidor para vaporizar a mistura. O líquido removido através do ebulidor é designado por resíduo. O vapor ascende ao longo da coluna, até atingir o topo, sendo arrefecido por meio de um condensador. Parte deste líquido

condensado é reenviado para o topo da coluna designando-se por refluxo, outra parte é removido tomando o nome de destilado ou produto de topo.

3.5 - Princípios de destilação

Segundo *Coulson e Richardson* (1991) a separação de componentes de uma mistura líquida, através de destilação depende da diferença nos pontos de ebulição dos constituintes da mistura. Depende também, da concentração dos componentes na mistura, devendo a mistura ter um ponto de ebulição diferente do ponto de ebulição dos seus constituintes puros.

3.5.1 - Pressão de vapor e ponto de ebulição

A pressão de vapor de um líquido, a uma determinada temperatura, é a pressão de equilíbrio exercida pelas moléculas que saem e entram na superfície líquida. Existem algumas considerações a fazer relativamente à pressão de vapor:

- O aumento de energia aumenta a pressão de vapor;
- A pressão de vapor está relacionada com o ponto de ebulição;
- Um líquido entra em ebulição, quando a sua pressão de vapor iguala a pressão de funcionamento;
- A facilidade com que um líquido entra em ebulição depende da sua volatilidade;
- Líquidos com elevadas pressões de vapor (líquidos voláteis) entram em ebulição a temperaturas mais baixas;
- A pressão de vapor e o ponto de ebulição de uma mistura líquida dependem da quantidade relativa dos componentes na mistura;
- A destilação ocorre, devido à diferença de volatilidade dos componentes na mistura líquida.

3.5.2 - Volatilidade Relativa

A volatilidade relativa é uma medida da diferença da volatilidade de dois componentes, e também do ponto de ebulição. Dá-nos uma medida da facilidade ou dificuldade com que determinada separação, de uma mistura líquida, se dá. A volatilidade relativa de um componente i, em relação a um componente j, é dada por:

$$\alpha_{ij} = \frac{\frac{y_i}{x_i}}{\frac{y_j}{x_j}} \qquad \textbf{(Eq. 3.1)}$$

onde:

y_i – fracção molar do componente i na fase vapor

x_i – fracção molar do componente i na fase líquida

Se a volatilidade relativa de dois componentes for próxima de 1, significa que possuem pressões de vapor aproximadas, tendo também pontos de ebulição próximos, o que dificulta a separação por destilação.

3.5.3 – Equilíbrio Líquido-Vapor

O diagrama de equilíbrio mostra como a composição dos componentes em equilíbrio, numa mistura líquida, variam com a temperatura para uma determinada pressão. Consideremos o seguinte exemplo, de uma mistura líquida contendo dois componentes, A e B:

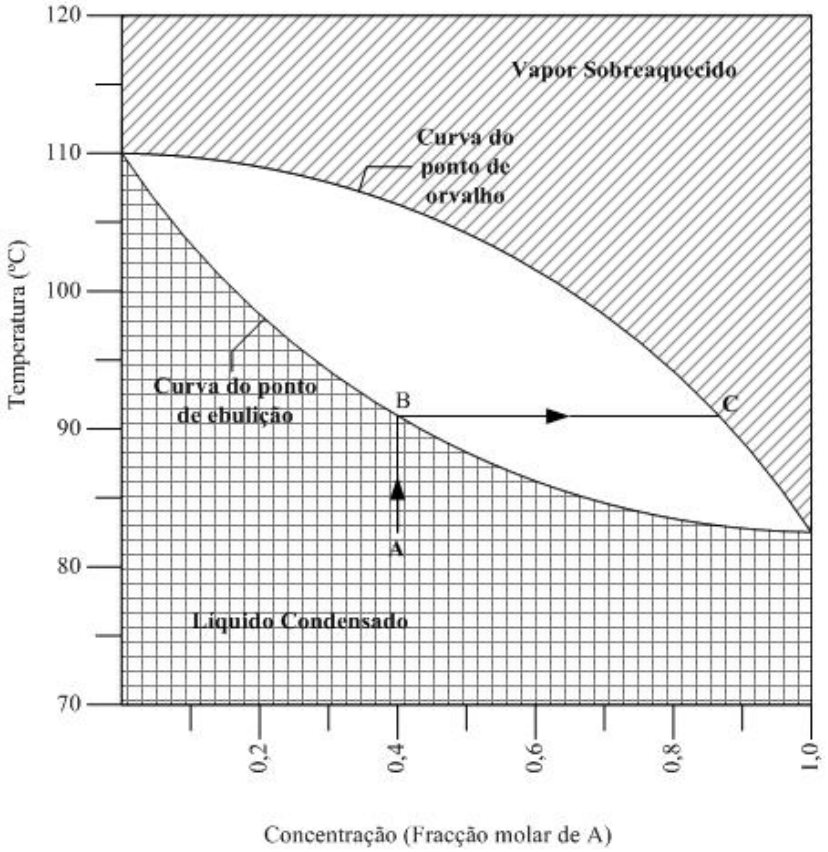


Figura 3.1 - Exemplo de um diagrama de equilíbrio

O ponto de ebulição do componente A determina-se para uma fracção molar de A igual a 1,0. O ponto de ebulição do componente B determina-se para uma fracção molar de A igual a zero (0). No diagrama anterior, o componente A é o mais volátil, logo tem um ponto de ebulição inferior ao do componente B. A curva superior do diagrama é designada por Curva do ponto de orvalho, enquanto a curva inferior é designada por Curva do ponto de ebulição.

O ponto de orvalho corresponde à temperatura a que o vapor saturado começa a condensar.

O ponto de ebulição corresponde à temperatura a que o líquido entra em ebulição.

A região acima da curva do ponto de orvalho, dá-nos a composição em equilíbrio do vapor sobreaquecido, enquanto a região abaixo da curva do ponto de ebulição dá-nos a composição em equilíbrio do líquido subarrefecido.

Por exemplo, quando um líquido subarrefecido com uma fracção molar de A igual a 0,4 (**A**) é aquecido, a sua concentração mantém-se constante até atingir a curva do ponto de ebulição (**B**) e entrar em ebulição. O vapor formado durante a ebulição tem uma composição que é dada pelo ponto **C**, aproximadamente 0,8 (fracção molar de A), verificando-se que este vapor é mais rico no componente A do que o líquido original.

A diferença entre a composição do líquido e do vapor é a base do processo de destilação.

As colunas de destilação são projectadas com base numa propriedade dos componentes, que constituem a mistura líquida, o ponto de ebulição. O tamanho das colunas de destilação, em particular a altura, é determinado pelos dados do equilíbrio líquido-vapor da mistura.

Curvas de equilíbrio líquido-vapor (VLE)

Para pressões constantes, os dados VLE são obtidos a partir dos diagramas do ponto de ebulição. Os valores VLE, para misturas binárias, são apresentados na forma gráfica, como se apresenta na figura 3.2.

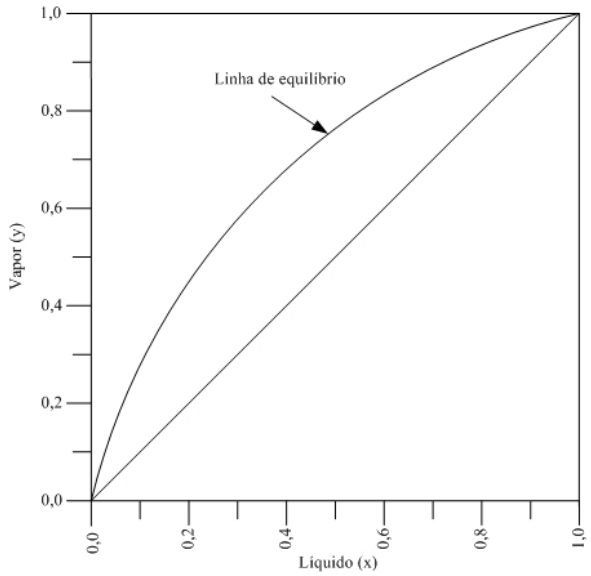


Figura 3.2 – Exemplo de curva de equilíbrio líquido-vapor

A figura VLE exprime o ponto de ebulição e o ponto de orvalho de uma mistura a pressão constante. A curva é designada por linha de equilíbrio e descreve a composição do líquido e do vapor em equilíbrio a uma determinada pressão. A figura 3.2 representa uma mistura binária, que possui um equilíbrio líquido-vapor uniforme, permitindo uma separação da mistura relativamente fácil.

As duas figuras seguintes, representam sistemas não-ideais, que implicam maiores dificuldades na separação, que podem ser identificados pela forma das curvas.

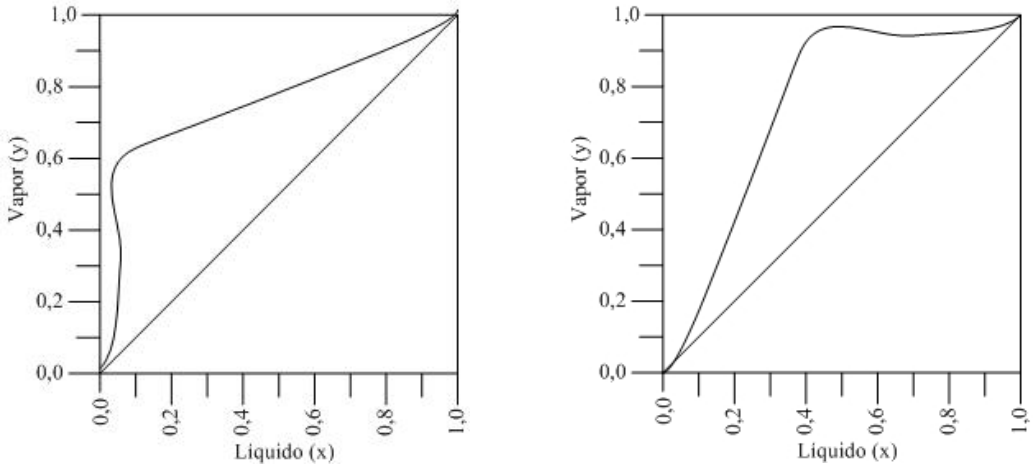


Figura 3.3 – Exemplo de sistemas não-ideais

3.6 - Projecto de colunas de destilação

As colunas de destilação são projectadas, utilizando dados de equilíbrio líquido-vapor (VLE) das misturas a separar. As características do equilíbrio líquido-vapor da mistura irão determinar o número de equilíbrios, logo o número de pratos ou altura do enchimento, necessários para se fazer a separação dos componentes da mistura.

3.6.1 - Método *McCabe-Thiele*

A primeira solução para o projecto de colunas de destilação binária, foi desenvolvido por *McCabe* e *Thiele* em 1925. A solução gráfica do balanço de massa, admitindo que o caudal molar é constante, é uma análise clássica em engenharia química e é geralmente designada por Diagrama de *McCabe-Thiele*. O método de *McCabe-Thiele*, é um método gráfico que combina as curvas de equilíbrio líquido-vapor com as linhas operatórias para estimar, para uma dada mistura binária e pressão de funcionamento da coluna, o número de equilíbrios e a razão de refluxo necessários para se atingir o grau de separação desejado. Além da curva de equilíbrio, este método envolve uma linha de referência a 45º, a linha operatória de rectificação, a linha operatória de "*stripping*", e uma 5ª linha, que representa o estado da alimentação à entrada da coluna.

Seguindo o método *McCabe-Thiele*, os balanços de energia são aplicados para a estimativa das necessidades energéticas do ebulidor e do condensador. As especificações e os resultados obtidos a partir do método *McCabe-Thiele* são, para uma destilação binária simples com uma única corrente de alimentação e dois produtos, os seguintes:

Especificações	**Resultados**
– Caudal de alimentação – Composição de alimentação (fracção molar) – Pressão de funcionamento da coluna – Estado da alimentação à pressão de funcionamento da coluna – Tipo de condensador (total ou parcial)	– Caudal de destilado – Caudal de resíduo – Número mínimo de equilíbrios – Razão de refluxo mínimo – Razão de refluxo – Caudal de vapor – Número de equilíbrios – Localização do ponto óptimo de

Especificações	Resultados
– Tipo de ebulidor (normalmente parcial) – Composição do destilado (fracção molar) – Composição do resíduo (fracção molar) – Razão de refluxo para refluxo mínimo	alimentação – Composição, em equilíbrio, do líquido e do vapor

3.6.2 - Método *Ponchon-Savarit*

O método de *McCabe-Thiele*, assume que os caudais molares de líquido e vapor são constantes, num estado de equilíbrio. Este facto elimina a necessidade de fazer um balanço energético em cada estádio de equilíbrio. Para misturas binárias não-ideais, esta premissa de constância de caudais molares na zona de rectificação e esgotamento não é válida e o método *McCabe-Thiele* não é rigoroso. Um método gráfico que inclui os balanços energéticos e as curvas de equilíbrio é o método *Ponchon-Savarit*. Este método utiliza diagramas composição-entalpia para determinação do número de equilíbrios necessários para se alcançar um determinado grau de separação.

3.7 - Simulação de Colunas de Destilação

O desenvolvimento da modelação computacional de processos químicos nas 2 últimas décadas foi bastante grande. Com estes avanços, foi possível disponibilizar novas bases de dados termodinâmicos e novos algoritmos (por vezes complexos) para a resolução de conjuntos de equações que permitem fazer uma previsão do desempenho dos processos. Verificaram-se também, desenvolvimentos em ferramentas de "*design*" e síntese.

Por vezes, a simulação é considerada como uma área relativamente simples, mas, a necessidade de modelos mais fiáveis para a transferência de massa, reacções químicas e processos dinâmicos continua a ser um desafio para os investigadores. Em vez da área de maior actividade dos engenheiros de processos ser o desenvolvimento de modelos, é a utilização dos

modelos, o seu conhecimento, a sua aplicação adequada e as limitações dos modelos que se relevam um desafio.

As bases de conhecimento necessárias para se realizar uma simulação são poucas, no entanto pode tornar-se bastante perigoso. É vital que um engenheiro que trabalhe com modelação saiba como e quando utilizar determinado modelo e que decisões tomar para prosseguir a modelação, e quando se deve parar com a modelação e realizar experiências que confirmem, ou não, os resultados obtidos.

Existem diversos simuladores disponíveis para a realização de simulação de processos químicos. Os mais utilizados são, o *Aspen Plus* (*Aspen Technology*, 1999), o *HYSYS* (*AEA Technology Engineering Software,* 1997) e o PRO-II (*Simulation Science Inc.,* 1999). Todos estes pacotes de *software* incluem uma base de dados termodinâmicos e têm capacidade de simular uma unidade industrial completa, incluindo unidades de destilação e muitas outras operações unitárias. Estas ferramentas, também têm a capacidade de permitir adicionar componentes especiais ou modelos. Uma vez feitas as especificações iniciais, estes simuladores podem construir e resolver as equações dos modelos (podem atingir as centenas e até mesmo milhares) e apresentar os resultados, a interpretação destes resultados é outro desafio.

Os Diagramas do Processo são a "linguagem" dos processos químicos. Estes diagramas descrevem um processo já existente ou em fase de projecto, com o detalhe suficiente para ser possível a avaliação das suas características. A análise, ou simulação, é a ferramenta que o engenheiro utiliza para interpretar o diagrama do processo, localizar falhas no processo e prever o rendimento do processo. A base desta análise são modelos matemáticos, ou seja, uma colecção de equações que definem as variáveis do processo, como as temperaturas, a pressão, os caudais, a composição das correntes, a área superficial, a configuração de válvulas, etc. Atribuindo valores às variáveis do processo, previamente definidas, é possível obter-se as variáveis desconhecidas através da utilização destes simuladores. Existem vários níveis de análise, que podem ir desde os balanços mássicos, aos balanços mássicos e energéticos, ao dimensionamento de equipamento e à análise de lucros.

Na realidade, a maioria dos processos químicos envolve equipamentos convencionais, como, permutadores de calor, bombas, colunas de destilação, etc. Para estas unidades processuais, as equações não diferem muito entre os processos químicos. As propriedades físicas, termodinâmicas e cinéticas variam, mas as equações não. Logo, é possível deduzir uma ou mais equações para a resolução de algoritmos de unidades processuais para solucionar balanços mássicos, balanços energéticos, dimensões e custo de equipamentos.

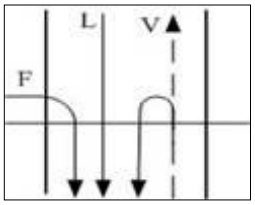
3.8 - Factores que afectam o desempenho de colunas de destilação

O desempenho de colunas de destilação é condicionado por vários factores, que se apresentem a seguir:

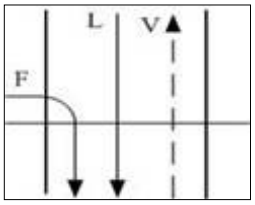
3.8.1 - Condições da alimentação

Nomeadamente, o estado da alimentação, a composição e a existência de elementos que possam afectar o equilíbrio líquido-vapor. O estado da alimentação e a sua composição tem influência no número de estádios de equilíbrio necessários para o grau de separação pretendido.

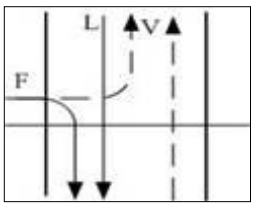
O estado da alimentação é determinado pela pressão de funcionamento da coluna. A alimentação pode entrar na coluna nas seguintes fases:



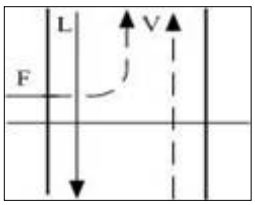
1- Líquido frio. Neste caso, verifica-se uma diminuição da temperatura no ponto de alimentação, e como consequência o refluxo abaixo do ponto de alimentação aumenta, devido à condensação de parte do vapor ascendente, aumentando também as necessidades energéticas do ebulidor.



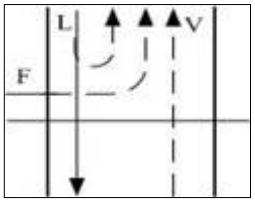
2- Líquido à temperatura de ebulição. O caudal de líquido descendente, proveniente do refluxo, junta-se ao caudal de alimentação, aumentando o caudal de líquido descendente ao longo da coluna.



3- Parcialmente vaporizado. Para este caso, parte do caudal de alimentação que entra na forma de vapor, sobe ao longo da coluna juntamente com o vapor proveniente do ponto abaixo da alimentação. Parte do caudal de alimentação, que entra na fase líquida junta-se ao caudal de refluxo.



4- Vapor saturado. O caudal de vapor ascendente, aumenta quando passa no ponto de alimentação, "arrastando o caudal de alimentação que entra na fase de vapor saturado.



5- Vapor sobreaquecido. Nesta situação, o caudal de alimentação, na forma de vapor, sobe juntamente com o vapor proveniente do ponto abaixo da alimentação e vai ainda vaporizar parte do caudal de líquido descendente proveniente do refluxo.

Durante o funcionamento da coluna, se existirem desvios excessivos relativamente às especificações da alimentação, a coluna pode não satisfazer as necessidades de separação. Para se ultrapassar estes problemas, algumas colunas são projectadas com múltiplos pontos de alimentação, quando se prevê que possam existir variações nas composições da alimentação.

3.8.2 - Condições de refluxo

Para se atingir um determinado grau de separação, são possíveis diferentes combinações de razão de refluxo.

O valor óptimo para a razão de refluxo e o número de equilíbrios é uma relação de compromisso. Este compromisso consiste num balanço ao investimento inerente à necessidade de um maior número de equilíbrios (número de pratos ou altura de enchimento) à medida que a razão de refluxo diminui. À medida que se aumenta a razão de refluxo, significa que a maioria do produto destilado, rico no componente mais volátil, está a ser reciclado para a coluna, tornando a separação mais eficaz, sendo necessário um menor número de pratos (equilíbrios) para a obtenção do mesmo grau de separação. À medida que a razão de refluxo se aproxima do valor mínimo, o número de equilíbrios tende para infinito, e quando a razão de refluxo toma maiores valores o número de equilíbrios aproxima-se do mínimo.

Com o aumento da razão de refluxo, aumenta também o caudal de vapor ascendente e o caudal de líquido descendente ao longo da coluna, por conseguinte as necessidades energéticas para o aquecimento e arrefecimento também aumentam.

Com a diminuição do número de equilíbrios, a altura da coluna diminui, mas o diâmetro aumenta. Quando a razão de refluxo se encontra perto da razão de refluxo mínima, pequenos incrementos na razão de refluxo implicam uma diminuição considerável da altura da coluna e o diâmetro da coluna sofre apenas um ligeiro aumento, resultando numa diminuição dos custos do equipamento. Com o aumento progressivo da razão de refluxo, a altura da coluna pouco varia e o diâmetro aumenta consideravelmente, logo, os custos que se minimizam pelo facto da altura da coluna ter diminuído são menores que os custos acrescidos pelo aumento do diâmetro.

Por outro lado, à medida que a razão de refluxo diminui torna-se necessário um maior número de pratos (equilíbrios) para se conseguir a separação pretendida. O limite ocorre quando temos uma razão de refluxo mínima, ou seja, quando são necessários um número infinito de pratos (equilíbrios) para se obter a separação da mistura. A maioria das colunas de destilação é projectada de forma que a razão de refluxo seja 1,2 a 1,5 vezes a razão de refluxo mínima.

3.8.3 - Condições internas do fluxo de líquido e vapor

A maioria dos factores que afectam o normal funcionamento de uma coluna de destilação está relacionada com o excesso ou défice de fluxo de vapor ao longo da coluna, sendo este dependente do diâmetro da coluna. Se o diâmetro da coluna não for o apropriado a coluna não terá um bom desempenho, quer em termos operacionais quer em termos de eficiência de separação.

Colunas de Pratos

Condições adversas no caudal de vapor podem causar espuma, arrastamento, gotejamento, descarga e inundação da coluna.

A formação de espuma tem origem na expansão do líquido durante a passagem à fase de vapor. Apesar de favorecer o contacto interfacial líquido-vapor, o excesso de espuma pode levar à acumulação de líquido nos pratos. Em certos casos, a formação de espuma pode ser de tal forma prejudicial que, esta se possa misturar com o líquido do prato superior. A formação de espuma depende principalmente das propriedades físicas da mistura líquida, podendo também ser devida às condições e/ou ao tipo de prato ou enchimento utilizado. Qualquer que seja a causa, a eficiência de separação é sempre menor.

O arrastamento refere-se ao líquido trazido pelo vapor para o prato superior e é causado pelas elevadas taxas de vapor. É prejudicial, uma vez que reduz a eficiência dos pratos, pois é arrastado material menos volátil para um prato que possui um líquido com uma composição elevada no componente mais volátil. Um arrastamento excessivo pode ter como consequência a inundação dos pratos.

A inundação é causada por uma elevada taxa de vapor, provocando um arrastamento do líquido juntamente com o vapor ao longo da coluna. O aumento de pressão provocado pelo excesso de vapor, força o líquido a subir no tubo de escoamento que por sua vez irá provocar um aumento de líquido no prato superior. Dependendo do grau de inundação, a capacidade da coluna pode diminuir bastante. A inundação pode ser detectada por um acentuado aumento na pressão da coluna e uma diminuição na eficiência na separação.

O fenómeno de gotejamento é causado por uma taxa de vapor reduzida. A pressão exercida pelo vapor é insuficiente para manter o líquido nos pratos. Logo, o líquido começa a escorrer através dos orifícios dos pratos. Um gotejamento excessivo, pode mesmo levar à descarga dos pratos, ou seja, o líquido dos pratos vai escorrer através destes até à base da coluna, sendo necessário um novo arranque da coluna. O gotejamento pode ser identificado através de uma

acentuada perda de pressão na coluna e uma baixa eficiência na separação. O gotejamento determina o fluxo mínimo de vapor, enquanto a inundação determina o fluxo máximo de vapor.

Colunas de Enchimento

Uma distribuição uniforme do caudal de líquido e de vapor na coluna melhora a eficiência do enchimento. Por vezes, as partículas que constituem o enchimento aleatório podem alojar-se no interior de outras, podendo levar a que o caudal de líquido tome caminhos preferenciais, tendo como consequência uma diminuição de eficiência.

Para caudais de líquido baixos, pode existir uma fraca molhabilidade do enchimento reduzindo a eficiência e o escoamento do líquido na coluna.

Quando o caudal de líquido na coluna é elevado, pode verificar-se alguma dificuldade na separação da fase de vapor da fase líquida, quando o espaço disponível para o escoamento do líquido for muito pequeno.

No caso do enchimento ser de polipropileno, pode haver o risco de aparecimento de espuma, quando se trabalha em condições alcalinas. Esta espuma é causada devido à ruptura de ligações dos aditivos introduzidos no polipropileno. A grande desvantagem do plástico, está relacionada com a sua fraca molhabilidade. Enquanto o carácter hidrofílico da cerâmica, e também do metal apesar de menor, promove a formação de uma fina camada de líquido à superfície mesmo a baixos caudais, o efeito hidrofóbico do plástico torna mais difícil esta formação da camada de líquido à superfície do enchimento. Esta baixa molhabilidade pode causar problemas, particularmente na fase inicial de funcionamento.

Existem relatados na literatura, vários casos de mau desempenho de colunas de enchimento estruturado, quando existem condições de serviço de elevado caudal de líquido ou com elevadas pressões. No entanto, as causas deste mau desempenho ainda não estão clarificadas. Os autores *Kurtz et al* (1991) e *Kister* e *Gill*(1992) identificam o elevado caudal e a formação de espuma como factores chave. O caudal é elevado quando o caudal de líquido é elevado e/ou quando a pressão de funcionamento é elevada. A formação de espuma é promovida pela baixa tensão superficial presente na destilação quando a pressão é elevada. Quando estão presentes elevados caudais ou pressões de funcionamento elevadas, a separação da fase vapor da fase líquida torna-se difícil, e com o aparecimento de elevada quantidade de espuma, mais difícil ainda será a separação da fase vapor da fase líquida. Como o enchimento estruturado permite muito menos movimento dos fluidos do que o enchimento aleatório, muito menos vapor será arrastado para baixo, causando reciclo e uma diminuição da eficiência.

Na literatura, existem muitas definições para descrever o fenómeno de Inundação, em colunas de enchimento. Os sintomas utilizados para identificar o fenómeno da inundação incluem o aparecimento de líquido no topo do enchimento, arrastamento excessivo, acentuado aumento da queda de pressão, elevação do nível de líquido, e diminuição acentuada da eficiência.

Para caudais de líquido baixos, a queda de pressão deve-se essencialmente a perdas por fricção.

Para caudais de líquido elevados, o "espaço" disponível para o caudal de vapor é menor devido à presença de líquido, aumentando a queda de pressão. À medida que o caudal de vapor aumenta, atinge-se um ponto em que o vapor começa a interferir com o líquido descendente e impede que o líquido desça na coluna. Neste ponto, a queda de pressão começa a aumentar repentinamente devido à acumulação de líquido que impede que o caudal de vapor ascenda na coluna. À medida que a acumulação de líquido aumenta, atinge-se uma condição em que a superfície do líquido é contínua no topo do enchimento.

3.8.4 - Estado dos pratos ou enchimento

O número de pratos necessários para uma determinada separação é determinado pela eficiência dos pratos utilizados, ou pela eficiência do enchimento se se tratar de uma coluna de enchimento. Sendo assim, qualquer factor que cause uma diminuição na eficiência dos pratos, ou enchimento, irá afectar o desempenho da coluna. A eficiência dos pratos ou enchimento é afectada por incrustações, desgaste e corrosão. A taxa de ocorrência deste tipo de problemas depende fundamentalmente das propriedades das substâncias utilizadas, sendo fundamental uma boa selecção relativamente aos materiais empregues na construção dos pratos ou enchimento.

3.8.5 - Condições ambientais

A maioria das colunas de destilação encontra-se em contacto com o ambiente. Apesar de grande parte das colunas de destilação se encontrarem isoladas, a alteração das condições ambientais pode afectar o funcionamento da coluna. O ebulidor e o condensador devem ser devidamente dimensionados, tendo em consideração a variação das temperaturas ao longo do ano, uma vez que, poderão existir grandes variações de temperatura, devendo a instalação responder de igual modo durante todo o ano.

3.9 - Causas de mau funcionamento de colunas de destilação

O autor *Kister* (1997) concluiu que a destilação é a técnica de separação mais popular que serve de base de comparação com outras técnicas. A utilização da tecnologia informática veio revolucionar o projecto, o controlo e a análise do processo de destilação. Com *hardware* de maior capacidade e eficiência desenvolveram-se e melhoraram-se técnicas de resolução de problemas. Com tudo isto, seria de esperar que a taxa de avarias em colunas de destilação tendesse a diminuir, tornando-se extintas no século XXI.

Sloley et al (1995), apresentaram um estudo envolvendo 126 avarias em colunas de destilação, tendo concluído que a maioria das avarias eram devido a aspectos de gestão e aplicação incorrecta do conhecimento existente. Concluíram também, que quase todas as falhas se deveram à falta de formação, experiência, recursos, falha do sistema ou má aplicação do conhecimento técnico existente. Os autores consideraram que, enquanto se continuar a desenvolver esforços para aprofundar os conhecimentos acerca da transferência de massa, irão continuar a ocorrer avarias devido a falhas provocadas por erro humano.

Um estudo mais recente desenvolvido por *Kister* (2003), baseado em mais de 300 casos históricos de mau funcionamento de colunas de destilação documentados em literatura entre 1950 e 1990, mostra que nem todas as avarias têm origem em falhas humanas. *Kister* (2003), recolheu informação de casos de mau funcionamento de colunas de destilação em 2 períodos de tempo distintos, entre 1950 a 1990 e de 1990 a 1997.

Quadro 3.1 - Causas de mau funcionamento de colunas de destilação registado entre 1950-1990 e 1990-1997

Tipo de Indústria	1950 - 1990		1990 – 1997	
	Número de Casos	Percentagem de Casos	Número de Casos	Percentagem de Casos
Refinarias	110	37	97	32
Indústrias Químicas	111	37	94	31
Olefinas	47	16	56	19
Não Especificado	29	10	53	18
TOTAL	**297**	**100**	**300**	**100**

Kister (2003), verificou que, o número de casos encontrados para o período que vai de 1950 a 1990 é idêntico para o período 1990 a 1997, tal como se encontra reportado no quadro 3.1. Verifica-se que o período mais recente representa 20% do período anterior, mas o número de casos é sensivelmente o mesmo, o que leva a admitir que o número de avarias em colunas de destilação não está a diminuir, mas em crescimento acelerado. A partir da análise de 300 casos de mau funcionamento de colunas de destilação, retirados de artigos e publicações, *Kister* (2003) apresenta o quadro 3.2, onde resume os principais factores responsáveis pelo mau funcionamento de colunas de destilação.

Quadro 3.2 - Causas de mau funcionamento de colunas de destilação

Causa	Número de Casos Reportados	Percentagem de Casos Reportados
Problemas de instrumentação e controlo	52	18
Problemas internos da coluna	51	17
Dificuldades no arranque e na paragem da coluna	48	16
Dificuldades operacionais	38	13
Problemas no ebulidor ou no condensador	28	9
Problemas de projecto (dados de equilíbrio líquido-vapor, dimensões da coluna, tipo de enchimento, etc.)	21	7
Formação de espuma	18	6
Acidentes ocorridos durante a montagem da coluna	16	6
Disposição (*layout*) dos pratos e dos tubos de escoamento	13	4
Relief problems	12	4

O autor utilizou os seguintes critérios, para a selecção e classificação dos factores que causam o mau funcionamento de colunas de destilação:

- As colunas de destilação que, apesar de funcionarem razoavelmente foram melhoradas, não estão contabilizadas neste estudo;
- Problemas de corrosão ou incrustações foram considerados, apenas nos casos em que a origem destes problemas se deva a aspectos construtivos da coluna e ao seu funcionamento e controlo. Não foram considerados problemas de corrosão acelerados, provocados pela má distribuição do líquido, pela remoção deficiente de água, pelo deficiente controlo do valor de pH e por uma má aplicação do inibidor de corrosão.

Fazendo uma análise do quadro 3.2, verifica-se que:

- Os problemas relacionados com a instrumentação e controlo, o arranque e a paragem da coluna, e as características internas da coluna, são as principais causas de mau funcionamento de colunas de destilação. Estas causas, representam mais de metade dos casos de incidentes verificados com colunas de destilação.
- Problemas no ebulidor, no condensador e também dificuldades operacionais representam cerca de metade dos restantes problemas, ou seja 25% dos incidentes. Podendo dizer-se que, em 4 incidentes, 3 são causados por um das causas referidas neste ponto e no anterior.
- Os problemas relacionados com dados de equilíbrio líquido-vapor, dimensões da coluna, tipo de enchimento, formação de espuma, acidentes ocorridos durante a montagem da coluna, problemas nos pratos ou nos tubos de escoamento e em válvulas de segurança, representam as restantes causas de mau funcionamento de colunas. Pode-se então dizer que, em 4 incidentes apenas 1 é causado pelos factores referidos neste ponto.
- Os factores de dimensionamento (projecto) como por exemplo os dados de equilíbrio líquido-vapor, a razão de refluxo, os cálculos de equilíbrio, o tipo de pratos ou enchimento, a determinação do diâmetro da coluna, os caudais e a eficiência dos pratos ou enchimento constituem o fundamento para a maior parte dos artigos publicados sobre destilação. Apesar destes factores constituírem a base para o dimensionamento e optimização de colunas de destilação, estes, não têm representatividade nas causas de mau funcionamento de colunas. Ainda analisando o quadro 3.2, verifica-se que em 14 incidentes, apenas 1 é causado por um dos factores atrás mencionados.

3.10 - Estratégia para a resolução de problemas em colunas de destilação

Na maioria das tarefas para a resolução de problemas em colunas de destilação, o que se pretende é que a resolução dos problemas seja a mais rápida possível e com o menor custo associado. No entanto, na maioria dos casos, este objectivo só é atingido parcialmente. Um dos maiores obstáculos à obtenção deste objectivo é a existência de uma fraca estratégia de abordagem do problema, ou até mesmo em certos casos, a inexistência de qualquer estratégia

A sequência de procedimentos que a seguir se apresenta é considerada como óptima para a resolução de problemas em colunas de destilação. Este procedimento é baseado nas experiências de *Kister* (1990), *Gans et al* (1983), *Harrison e France* (1989), *Lieberman* (1985), *Wallsgrove* e *Butler* (1990).

Em primeiro lugar uma boa estratégia para a resolução de problemas, deve partir sempre do simples e óbvio.

1. Avaliação dos riscos ambientais e de segurança que o problema pode envolver. No caso da existência de riscos, é necessário por em prática o plano de emergência antes de qualquer tentativa de resolução de problemas. A prevenção de ocorrência de problemas consequentes, deve ser prioritária, relativamente à investigação das causas do acidente.

2. Implementação de uma estratégia temporária para "suportar" o problema. A identificação do problema, sua resolução e correcção leva algum tempo. Entretanto, efeitos adversos quer a nível de segurança, a nível ambiental e a nível financeiro têm que ser minimizados. A estratégia e os efeitos adversos que têm que ser suportados, impõem, normalmente, o ritmo de investigação do problema.

3. Obtenção de uma definição clara e factual do problema. Uma pobre definição dos sintomas é um dos problemas mais comuns.

4. Análise do comportamento da coluna de destilação. Esta acção é fundamental no caso de termos uma definição pobre do problema. Em certos casos, é impraticável ou dispendiosa uma visita ao local do problema. Nestes casos, a definição do problema torna-se mais difícil, os responsáveis pela resolução do problema devem estar em contacto directo com a pessoa que opera com o equipamento, que por sua vez deverá estar familiarizado com o seu funcionamento e o seu histórico.

5. Conhecimento do histórico da coluna. A resposta à pergunta "O que estamos a fazer mal agora, que estávamos a fazer bem no passado?" é talvez, a melhor ferramenta disponível a utilizar na resolução do problema. No caso de se tratar de uma coluna

nova, deve ser feita uma análise às diferenças existentes entre a coluna nova e outras colunas semelhantes já em funcionamento. Devem ser, também, analisadas as diferenças entre o desempenho previsto e o desempenho actual da coluna. O conhecimento do historial da coluna, pode revelar a existência de problemas recorrentes/crónicos. Na existência deste tipo de problemas, devem analisar-se as circunstâncias actuais e as anteriores, de forma a encontrar-se algum ponto em comum. Este ponto em comum, no entanto, deve ser bem analisado, pois, um problema novo pode originar o mesmo sintoma, mas com origem em componentes/mecanismos diferentes.

6. Procura de incidentes ocorridos no início do problema. Deve ser feita uma revisão a cartas de controlo, gráficos de produção, linhas tendência do processo, etc. Deve estabelecer-se uma ordem cronológica de incidentes (ocorrências) para permitir a identificação do início do problema e suas consequências. Mesmo as ocorrências que parecem completamente afastadas do problema, devem ser analisadas à luz do problema.

7. Consulta de operadores e supervisores na coluna de destilação. Os operadores, com experiência, podem identificar o problema, apesar não o conseguirem explicar ou definir.

8. Não restringir a investigação à coluna. Por vezes, os problemas na coluna têm origem nos equipamentos a montante desta.

9. Estudo do comportamento da coluna, introduzindo pequenas alterações. Esta acção pode levar a uma melhor definição do problema, eliminando à partida certos factores. Devem ser registadas todas as observações e dados recolhidos.

10. Recolha de dados da coluna e dos equipamentos auxiliares. Deve duvidar-se da informação fornecida pela análise dos resultados das amostras, assim como dos dados fornecidos pela instrumentação. Sempre que possível deve fazer-se uma contra-análise. Os dados fornecidos pela instrumentação podem não ser reais, não por defeito na instrumentação, mas sim por outros problemas, como por exemplo: Válvulas de controlo fechadas; má organização das ligações entre os componentes da coluna, válvulas com fugas, válvulas parcialmente fechadas. Devem reunir-se os balanços de massa, os balanços energéticos e os balanços aos componentes, uma vez que estes funcionam como prova da consistência das leituras fornecidas pela instrumentação e da possibilidade de existência de fugas. Devem também ser revistos os cálculos hidráulicos, e ser testadas as condições de funcionamento de

forma a analisar-se a sua proximidade com as condições limite de funcionamento. No caso da existência de um problema de eficiência de separação, deve ser feita uma simulação da coluna (*HYSYS*) e devem ser recolhidas amostras ao longo da coluna, analisar os valores de temperatura e as perdas de calor.

Através dos procedimentos atrás descritos, é possível obter-se a definição do problema. Quando tal não acontecer, a informação, entretanto recolhida, será suficiente para limitar as possíveis causas do problema, assim como o desenvolvimento de uma teoria. Geralmente, quando surgem os problemas, existe um grande número de teorias. Na fase seguinte da investigação, estas teorias são testadas por experimentação ou pelo método das tentativas. As seguintes orientações aplicam-se a esta fase. Quando se formula uma teoria, deve analisar-se, com atenção, o funcionamento interno da coluna, não desprezando o que parece óbvio. Na maioria dos casos, a teoria mais simples provavelmente é a mais correcta.

Por vezes, uma falha óbvia não é a causa do problema. Uma das grandes lacunas na estratégia de resolução de problemas é o adiamento da resolução do problema causado por uma falha óbvia. Por vezes, esta falha aparece na maioria das teorias como sendo a causa do problema. *Kister* (2003) ao longo do seu trabalho deparou-se, em alguns casos, que a resolução de uma falha óbvia não solucionou o problema original, nem contudo melhorou o desempenho da coluna. Concluindo que assim que é detectada um falha óbvia, esta deve ser considerada como mais uma teoria.

A experimentação da teoria deve começar pela teoria mais fácil de provar sem ter em conta a sua probabilidade de ocorrência. No caso de se planear a paragem da instalação, o que é muito dispendioso, por vezes é comum dar-se prioridade à experimentação de teorias menos drásticas, apesar de serem menos prováveis. Deve-se evitar a execução de algumas alterações irreversíveis, antes de se ter terminado todas as experimentações das teorias existentes. Deve procurar-se a possibilidade de simplificação do sistema. Por exemplo, se se desconhece que a causa da falha é devido a um componente externo à coluna ou se é gerado no interior da coluna, deve considerar-se a possibilidade de operar a coluna no regime de refluxo total, para assim se esclarecer essa dúvida.

Os supervisores e os operadores devem ser envolvidos nas várias etapas de resolução do problema. Sempre que possível, devem ser atribuídas tarefas ao operador, deixando-lhe alguma liberdade de actuação. A experiência de *Kister* (2003) mostra que, em alguns casos, a resolução do problema passou pela intervenção de operadores motivados. Por outro lado, certos problemas não foram resolvidos pela fraca motivação do operador.

Deve ter-se cuidado relativamente à má comunicação durante a resolução do problema. Instruções verbais, a pressa e uma equipa de pessoal multidisciplinar podem levar a graves problemas de comunicação. Deve-se assegurar que as instruções são objectivas e suficientemente detalhadas. Deve-se reconhecer o perigo inerente a certas modificações de projecto. Muitos acidentes foram causados devido aos efeitos secundários provocados por simples alterações de projecto. Por vezes, os acidentes provocados por alterações de projecto são mais graves do que os provocados pelo problema original. As alterações devem ser devidamente documentadas e planeadas, e deve existir uma equipa que faça a sua revisão sistemática, utilizando uma "*check-list*" "*HAZOP*". Assim que forem concluídas as alterações, deve ser feita uma inspecção para se assegurar que as alterações foram implementadas correctamente.

Todas as reparações, as suas causas e os resultados da reparação devem ser documentados, para que esta informação seja útil em futuras intervenções.

A prática mais comum para a resolução de problemas é esperar até que surjam os problemas, por outro lado, uma prática mais "saudável" é prevenir a ocorrência de problemas, ajudando a eliminar as suas causas, mesmo antes da sua ocorrência.

Apesar da prevenção de incidentes não ser perfeita, pode reduzir bastante a probabilidade de ocorrência do problema, a severidade do problema e os seus efeitos.

A tabela seguinte, proposta por *Kister* (2003), assenta na prática mais comum, ou seja, esperar até que surjam os problemas, e descreve os sintomas dos problemas mais comuns ocorridos em colunas de destilação. As entradas 1, 2 e 3 têm o seguinte significado:

1. Causas comuns para este tipo de problema
2. Possíveis causas para este tipo de problema
3. Possível, mas relativamente improvável, causa para este tipo de problema

Nenhuma entrada da coluna significa que, uma causa não é comum ou improvável para um determinado problema. Esta tabela serve como um manual, e propõe potenciais causas para um determinado problema. Uma outra possível aplicação desta tabela é servir de base para a elaboração de uma "*check-list*" para a resolução de problemas.

Quadro 3.3 - Problemas mais comuns em colunas de destilação, *Kister* (2003)

Classificação do Problema	Limitações de capacidade					Fraca separação					Perigos e danos						Instrumentação e controlo			Equipamentos auxiliares				Caudais Baixos				Resolução de problemas/testes				Problemas Mecânicos	
Natureza do problema / Tópicos	Inundação prematura	Arrastamento excessivo (prematuro)	Formação de espuma	Perda de pressão elevada	Incrustações	Baixa eficiência dos pratos	Má distribuição dos pratos	Baixa eficiência do enchimento	Má distribuição do enchimento	Perda local de eficiência	Danos nos pratos ou enchimento	Outros danos internos da coluna	Danos localizados	Danos nas bombas	Falha catastrófica	Danos para os operadores	Controladores instáveis	Controladores ineficientes	Medições incorrectas	Fraca resposta do ebulidor	Fraca resposta do condensador	Problemas na tubagem	*Gravity pipping only*	*Poor turndown*	Fugas	Drenagem	Problemas relacionados com um fraco fluxo de líquido	Técnicas de resolução de problemas	Testes na coluna (Funcionamento)	Procedimentos iniciais de arranque	Arranque/Paragem	Facilidade de manutenção/Acesso	Resistência interna
Resolução de problemas																												1	1				
Entrada de topo e de refluxo	2	2		3			3			1			1										3									3	3
Entrada intermédia de alimentação	1	1		1			2			1		2	1									1										3	3
Distribuidores e *multipass inlets*	2	2		1	2	2	1			1		3	1									3										3	3
Distribuidor de líquido	2	2	3	1	1			1	1	2		3	3											1	2	3	1					3	3
Distribuidor de entrada	3	2	2	3	3			1	1	2		3	3									3		2	2	3							3
Redistribuidor	2	2	3	1	1			1	1	2														1			1						
Distribuidor de *flashing*	1	1	3	1	2			1	1	2	3	3	1									1		2			3						1
Distribuidor de vapor	1	1		1	2			1	1	2	3	3	1									3		3									1
Entrada do retorno para o ebulidor	1	1		1			3	1	1	1	1	1	1		1	2	2		2	1		2											2
Pulverizador	2	2		1	3			1	1	2	2	3	1							3		3											
Botton sumps e chicanas	2	3			3					1	3			1			3			3		1			2	1					3		
Once-through reboiler pan	1	1			3					1							3			1		1		1	1	2					3		
Pratos	1	1	3	1	3		3	1	1	1			2	1								1		3	1	1	1						
Tubos de escoamento	1	1			3					2				1			2					1		1	1	2	1						
Colectores	3				3			2	2	2				1			2					1			1	2						2	
Saída de vapor		1		1	1								1									1										2	
Linhas de gravidade	1										2	2	2	3		2	1						1										
Ligação à intrumentação	1	1	3	3	1	2		2		1	1	1	1		1	1	1	1	1	3		3							1	1	1	1	
Porta de inspecção													3			1																1	2

Quadro 3.3 - Problemas mais comuns em colunas de destilação, *Kister* (2003) (Cont.)

Classificação do Problema	Limitações de capacidade					Fraca separação					Perigos e danos						Instrumentação e controlo			Equipamentos auxiliares				Caudais Baixos				Resolução de problemas/testes				Problemas Mecânicos	
Natureza do problema / Tópicos	Inundação prematura	Arrastamento excessivo (prematuro)	Formação de espuma	Perda de pressão elevada	Incrustações	Baixa eficiência dos pratos	Má distribuição dos pratos	Baixa eficiência do enchimento	Má distribuição do enchimento	Perda local de eficiência	Danos nos pratos ou enchimento	Outros danos internos da coluna	Danos localizados	Danos nas bombas	Falha catastrófica	Danos para os operadores	Controladores instáveis	Controladores ineficientes	Medições incorrectas	Fraca resposta do ebulidor	Fraca resposta do condensador	Problemas na tubagem	*Gravity pipping only*	*Poor turndown*	Fugas	Drenagem	Problemas relacionados com um fraco fluxo de líquido	Técnicas de resolução de problemas	Testes na coluna (Funcionamento)	Procedimentos iniciais de arranque	Arranque/Paragem	Facilidade de manutenção/Acesso	Resistência interna
Espaçamento entre pratos						3																										1	
Diâmetro dos orifícios	3	3		3	1	3																											
Área dos orifícios	3	3		1		3										3								1									
Modelo dos pratos de válvulas	2	2		2	1	2	1				2			1										1	1								
Zona de repouso				3		3																		3	3								
Outlet weirs	3	3		2		2	2																	1	2		1						
Splash baffles/vapor hoods	1	2				2	3																		1		1						
Internal demister	3	1		1	1	3							1														2						
Chicanas para retorno do fluxo (???)						3	3																		2		1						
Stepped trays		1				3	1																	1	1								
Multipass trays	3					1	1																	3									
Alteração do número de passos	1	1			3	3	3			2																							
Vibrações induzidas pelo caudal											2	3	3		3																		
Tipo do tubo de escoamento	3				2		3																				1						
Largura do tubo de escoamento	1	3	1	3	2																												
Chicanas anti-jump	3																																
Vedante do tubo de escoamento	1	1																									1				1		
Clearance under dc	1	1		3	1																						1						
Inlet weirs/seal pans	1	1			1		3																		1	1	1						

Quadro 3.3 - Problemas mais comuns em colunas de destilação, *Kister* (2003) (Cont.)

Classificação do Problema	Limitações de capacidade					Fraca separação					Perigos e danos						Instrumentação e controlo			Equipamentos auxiliares				Caudais Baixos				Resolução de problemas/testes				Problemas Mecânicos	
Natureza do problema / Tópicos	Inundação prematura	Arrastamento excessivo (prematuro)	Formação de espuma	Perda de pressão elevada	Incrustações	Baixa eficiência dos pratos	Má distribuição dos pratos	Baixa eficiência do enchimento	Má distribuição do enchimento	Perda local de eficiência	Danos nos pratos ou enchimento	Outros danos internos da coluna	Danos localizados	Danos nas bombas	Falha catastrófica	Danos para os operadores	Controladores instáveis	Controladores ineficientes	Medições incorrectas	Fraca resposta do ebulidor	Fraca resposta do condensador	Problemas na tubagem	*Gravity pipping only*	*Poor turndown*	Fugas	Drenagem	Problemas relacionados com um fraco fluxo de líquido	Técnicas de resolução de problemas	Testes na coluna (Funcionamento)	Procedimentos iniciais de arranque	Arranque/Paragem	Facilidade de manutenção/Acesso	Resistência interna
Material de construção	3	3									1	1	1		1	1						3												1
Espessura dos componentes	3										2	2	2			2																		1
Suporte dos pratos	3						2				2	2	2			2																		1
Suportes	3	3				3		3	3		2	2	2			2									1		1					1	1
Manways																1									2							1	
Dilatação térmica											3	3	2																				2
Nível dos pratos	3	3				3	2																	2	2		2						
Drenagem dos pratos					1																					1					2		
Fugas						2														3				1	1		1						
Cápsula dos pratos						2					2	2		3										1	1		2						
Suporte do enchimento	1	1		1				3	3	3	1		1																				1
Estrutura de suporte	3	3		3				1	1	3	2																						1
Componentes de retenção	3	3		3				2	2		1			2																			1
Verticalidade da coluna de enchimento								2	2															2									
Alívio de sobrepressão											2	2			1	1																	
Pré-Montagem	2	2	2	2				2	2		2	2	1	1			3			3												2	3
Cuidados de segurança																1																1	
Remoção dos pratos ou enchimento											3	3	3			1						3										1	

Quadro 3.3 - Problemas mais comuns em colunas de destilação, *Kister* (2003) (Cont.)

Classificação do Problema	Limitações de capacidade					Fraca separação					Perigos e danos						Instrumentação e controlo			Equipamentos auxiliares				Caudais Baixos				Resolução de problemas/testes				Problemas Mecânicos	
Natureza do problema / Tópicos	Inundação prematura	Arrastamento excessivo (prematuro)	Formação de espuma	Perda de pressão elevada	Incrustações	Baixa eficiência dos pratos	Má distribuição dos pratos	Baixa eficiência do enchimento	Má distribuição do enchimento	Perda local de eficiência	Danos nos pratos ou enchimento	Outros danos internos da coluna	Danos localizados	Danos nas bombas	Falha catastrófica	Danos para os operadores	Controladores instáveis	Controladores ineficientes	Medições incorrectas	Fraca resposta do ebulidor	Fraca resposta do condensador	Problemas na tubagem	*Gravity pipping only*	*Poor turndown*	Fugas	Drenagem	Problemas relacionados com um fraco fluxo de líquido	Técnicas de resolução de problemas	Testes na coluna (Funcionamento)	Procedimentos iniciais de arranque	Arranque/Paragem	Facilidade de manutenção/Acesso	Resistência interna
Colocação de pratos ou enchimento	1	1		2		2	2	1	1	2	1	1	1			1						3		2	1		1					1	
Inspecção antes do arranque	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2		2	3	3	3		1	1	1	1			1		2	
Line blowing, pressuring, depressuring, purging	3	3			1			3	3		2	2			1	1						1								1			
Blinding/unbliding															1	1						1								1	1	1	
Teste de fugas															1	1												1		1	1		
Lavagem	3		2		1						2	2			2	2										1				1	1	3	
Funcionamento com vapor de água			3		1						1	1	2		2	2										1		3	2	1	1	3	
Formação de vapor					3						1	1	2		1	1										1				1	1	3	
Desidratação, Circulação de líquidos						3		3			1	1	2		1	1										1				1	1		
Teste com solventes						3		3																				2	1	3			
Arranque/Paragem					1						1	1	2	2	1	1								2		1				1	1	3	2
Arrefecimento/Aquecimento											1	1	1		2	2										1				2	1		1
Subarrefecimento/Sobreaquecimento excessivo	1	1								2	1	2	2		2																3		
Refluxo total					2										2	2													2		1		
Drenagem			2								1															1				2	2		
Vedação(estanquecidade)	1	1																									1				1	2	

Quadro 3.3 - Problemas mais comuns em colunas de destilação, *Kister* (2003) (Cont.)

Classificação do Problema	Limitações de capacidade					Fraca separação					Perigos e danos						Instrumentação e controlo			Equipamentos auxiliares				Caudais Baixos				Resolução de problemas/testes				Problemas Mecânicos	
Natureza do problema / Tópicos	Inundação prematura	Arrastamento excessivo (prematuro)	Formação de espuma	Perda de pressão elevada	Incrustações	Baixa eficiência dos pratos	Má distribuição dos pratos	Baixa eficiência do enchimento	Má distribuição do enchimento	Perda local de eficiência	Danos nos pratos ou enchimento	Outros danos internos da coluna	Danos localizados	Danos nas bombas	Falha catastrófica	Danos para os operadores	Controladores instáveis	Controladores ineficientes	Medições incorrectas	Fraca resposta do ebulidor	Fraca resposta do condensador	Problemas na tubagem	*Gravity pipping only*	*Poor turndown*	Fugas	Drenagem	Problemas relacionados com um fraco fluxo de líquido	Técnicas de resolução de problemas	Testes na coluna (Funcionamento)	Procedimentos iniciais de arranque	Arranque/Paragem	Facilidade de manutenção/Acesso	Resistência interna
Retorno do fluxo											2				1	2						1									1	2	
Deslocamento/Danos nos pratos											1	1																			1		
Nível do líquido na coluna	1	1		3							1	1	2	2	1	1	1		1	1											1		
Nível de líquido no reservatório														2	3	3			3		2												
Aumento súbito da pressão											1	1	2	2	1	1														1	1		
Impurezas	1	1	2			3		1			2	2	1				1													1	1		
Ausência de componente					1	1		1									2																
Cooking, hydrates, congelamento,			3		1																2	3		2							1		
Reacções químicas	2	2	2		1	1		1			3	3	2		1	1	3		3	3	3			2			3				3		
Perdas na troca de calor	2	3			1	1		1			2	2	2				2			1	1										1		
Heat integration spin	1	2															1														1		
Problemas de instrumentação	1	1	2	2		2					1	1	1	1	1	1	1		1	2	2			3						1	1		
Inundação	1	1		1																								1	1				
Formação de espuma			1	1																								1	1				
Testes de eficiência/desempenho						1		1		1																		1	1				
Outros testes									1															1				1	1				
Problemas de radioactividade	1	1	2		2		3		3		1	1	1						1									1	1				
Ebulidores	2	2			2	2		2			2	2	2		3		2		3	1		1										3	
Condensadores																					1	2											
Controladores da coluna	2	2			3	3		3		2					3		1	1	1	1	1	1		2			2						

3.11 - Simulação de Falhas em Colunas de Destilação

As colunas de destilação são dos equipamentos mais utilizados na indústria para a realização de operações de separação. Estes equipamentos envolvem questões de segurança devido à elevada quantidade de substâncias envolvidas e ao seu carácter inflamável. Perturbações durante o funcionamento, como a avaria de componentes pode resultar num desvio ao normal funcionamento da instalação, podendo mesmo levar a uma situação onde a unidade tem que ser despressurizada.

Apesar de se utilizarem muitos estudos de simulação para analisar o comportamento de colunas de destilação, raramente é utilizada esta ferramenta no estudo sistemático de falhas que ocorrem durante o funcionamento de colunas de destilação.

Deerberg et al (1996), enuncia que, além dos métodos convencionais, a simulação dinâmica pode ser uma excelente ferramenta para o estudo de questões de segurança em Engenharia Química. A simulação dinâmica detalhada de falhas operacionais, permite obter um elevado número de informação acerca de aspectos desconhecidos do processo. Como consequência, adquire-se um conhecimento aprofundado sobre o comportamento do processo. Com esta ferramenta de simulação, pode-se avaliar os riscos em condições de normal funcionamento, assim como, no caso de falhas operacionais em que possam ser tomadas medidas preventivas.

É necessário considerar, não apenas o resultado proveniente da coluna, mas também, considerar outros componentes importantes da instalação (válvulas, bombas, ebulidor, condensador, corrente de vapor, meio de refrigeração, etc), e também sistemas de protecção instalados. Considerando a influência dos comportamentos mencionados anteriormente no processo dinâmico, pode responder a várias questões.

Os aspectos físicos mais importantes que devem ser considerados em colunas de destilação são:

- Influência da hidrodinâmica e da transferência de massa;
- Estabilidade do controlo em condições de funcionamento anormais;
- Consequências das condições de funcionamento na segurança;
- Eficácia do sistema de protecção

Para desenvolver ferramentas de simulação para a análise da segurança, as características do processo têm que ser conhecidas. As consequências mais significativas para a segurança têm que ser detectadas e integradas no modelo do processo.

Um estudo desenvolvido por *Kister* (1990), mostra que os incidentes de segurança relatados, ocorrem em colunas de destilação e que têm aumentado nos últimos anos. As causas para estes acidentes podem ser muitas, mas o projecto defeituoso, os erros operacionais e as falhas em componentes, são as causas mais comuns. Este estudo também mostrou que cerca de metade das ocorrências podiam ter sido evitadas, se houvesse mais formação e experiência durante a fase de projecto e instalação.

Dependendo do tipo de coluna de destilação, podem ser identificadas várias causas de acidentes. Em primeiro lugar existe o perigo de explosão e incêndio devido à emissão de gases inflamáveis. Em segundo lugar, a ocorrência de reacções indesejáveis como a polimerização ou a decomposição devido ao aumento inesperado da temperatura, consequência de alterações das condições normais de funcionamento.

O objectivo da tecnologia de segurança é analisar todos os potenciais riscos, assim como, determinar as medidas preventivas e operacionais adequadas, incluindo recomendações no dimensionamento e alterações de segurança.

Uma análise sistemática das causas que podem levar à ocorrência de falhas de funcionamento, resultando num comportamento dinâmico em colunas de destilação, ainda não foi feito até esta altura.

Kister (1990), enumerou numa lista algumas das causas que podem resultar na sobrepressão de colunas de destilação. Estas causas são:

Falha de Serviço:	Perda de líquidos de refrigeração
	Perda de energia eléctrica
	Perda de vapor
	Perda de ar
Falha de Controladores:	Falha do controlador de vapor
	Falha no controlador de pressão
	Falha no controlador da alimentação
	Falha no controlador do refluxo
Fontes Externas:	Perda de calor na corrente de topo
	Falha no permutador de calor
	Incêndio no exterior

Fontes Internas: Acumulação de não-condensáveis

Reacção química

Obstrução das saídas da coluna

Explosão interna

Neste capítulo definiu-se a Operação Unitária Destilação, identificou-se o equipamento básico de destilação e foram estabelecidos os princípios da Destilação, nomeadamente Pressão de Vapor, Ponto de Ebulição, Volatilidade Relativa e Equilíbrio Líquido-Vapor. Foram referidos ainda os métodos utilizados no projecto de colunas de destilação (*McCabe-Thiele* e *Ponchon-Savarit*) e finalmente foram referidas causas de mau funcionamento de colunas de destilação e quais os factores que afectam o seu desempenho.

PÁGINA EM BRANCO

CAPÍTULO 4

Descrição da Unidade Piloto e Aplicação de uma Análise FMEA

PÁGINA EM BRANCO

No capítulo 4 é feita a apresentação do equipamento em estudo, descrevendo-se em pormenor toda a instalação. Numa segunda parte do capítulo, o equipamento é organizado de acordo com a função atribuída a cada subsistema e posteriormente é feita uma análise dos modos de falha e seus efeitos componente a componente.

4.1 - Descrição do Equipamento

O equipamento em estudo, trata-se de uma coluna de destilação contínua de enchimento, à escala piloto (figura 4.1), para ser utilizada para fins didácticos e de investigação no Laboratório de Tecnologia Química do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

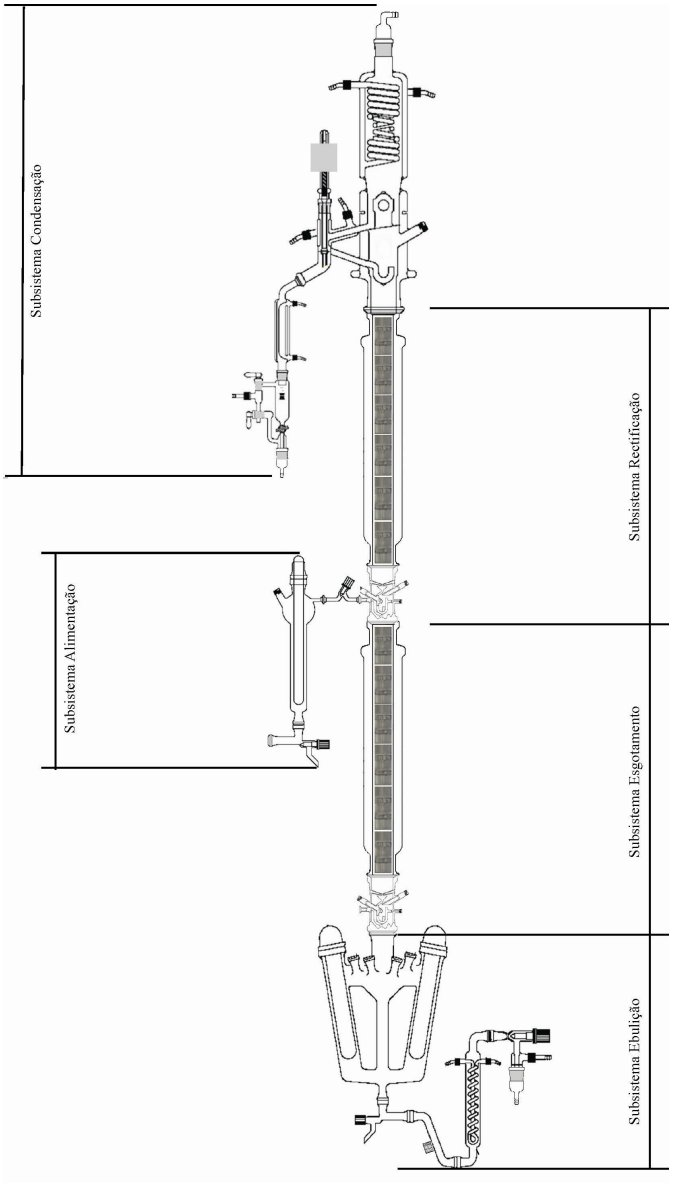


Figura 4. 1 – Coluna de destilação dividida em subsistemas funcionais

A instalação completa é constituída pela coluna de destilação, pela unidade de aquisição e controlo (UAC) e pela estrutura de suporte.

A coluna de destilação é constituída por cinco zonas funcionais:

- Zona de ebulição
- Zona de esgotamento
- Zona de alimentação
- Zona de rectificação
- Zona de condensação

A estrutura metálica de suporte tem uma altura de 3,7 m; 1,0 m de largura na base; 0,5 m de largura no topo e 0,5 m de profundidade. A coluna de destilação encontra-se suportada no interior desta estrutura metálica, em forma de rede, por meio de flanges, garras e nozes, fixas às barras metálicas da estrutura. Na sua totalidade a instalação é constituída por 326 componentes de diversos materiais: vidro *Duran*®/Borosilicato3.3; liga de aluminínio-silício, aço inoxidável; *Teflon;* plástico e Quartzo.

A Coluna de Destilação tem um diâmetro interno de 43 mm e enchimento do tipo estruturado, *Mellapak* 1900 da *Sulzer*, em malha metálica.

O ebulidor tem instalado uma potência de aquecimento de 4000 W e um volume de 1,5 L, sendo o nível de líquido no ebulidor monitorizado através de 2 sensores de nível (nível mínimo e nível máximo), e controlado através de uma válvula de controlo proporcional (VC). Além dos sensores de nível, o ebulidor tem a seguinte instrumentação: termopar "duplo", uma toma dupla de pressão diferencial na entrada E_3 e uma toma de pressão diferencial no tubo angular. O resíduo, que sai pela base do ebulidor, passa num condensador onde é arrefecido pela passagem de água, que circula no interior da serpentina do condensador, sendo recolhido no tanque do resíduo, T_R. O líquido do tanque do resíduo é transferido para o tanque de alimentação, T_A, através da bomba peristáltica BB-2.

A alimentação é transportada por meio de uma bomba peristáltica, para a unidade de alimentação, sendo aquecida por uma resistência de quartzo de 1000 W até à temperatura imposta pelo utilizador, temperatura esta que pode ser monitorizada e controlada através de um termopar "duplo", que se encontra no topo da unidade de alimentação, e de um controlador de temperatura. A alimentação, depois de aquecida, entra a meio da coluna de destilação, mais especificamente no adaptador de coluna AdptCol-2.

As unidades de esgotamento e rectificação são constituídas por um adaptador de coluna, uma coluna de vidro com 1 m de altura e 6 módulos de enchimento que se encontram no interior da coluna. No adaptador de coluna AdptCol-1, encontram-se inseridos dois termopares que medem a temperatura do líquido descendente e a temperatura do vapor ascendente, e onde é também possível fazer a recolha de amostras de líquido e de vapor neste ponto. No AdptCol-2 encontra-se acoplada a unidade de alimentação e um termopar que permite acompanhar a temperatura do vapor ascendente neste ponto.

A unidade de condensação está equipada com uma válvula solenóide que faz o controlo da razão de refluxo. A condensação do vapor é feita à custa da circulação de uma corrente de água fria, no interior da serpentina do condensador. O líquido destilado é ainda arrefecido antes de sair da instalação, passando por um condensador mais pequeno, onde também circula uma corrente de água fria, no interior da serpentina. No topo da unidade encontra-se uma toma de pressão diferencial e uma toma de pressão absoluta, à entrada um termopar que fornece informação acerca da temperatura do vapor que entra na unidade de condensação.

Todas as variáveis monitorizadas (temperaturas do líquido e vapor, pressão absoluta, pressões diferenciais, nível de líquido no ebulidor e caudais de refrigeração e de destilado) são adquiridas através de módulos *Field Point* e monitorizadas através de uma aplicação em *Labview*. A partir desta aplicação é também possível regular a razão de refluxo, o caudal de alimentação, o caudal de refrigeração, controlar a potência de aquecimento no ebulidor, a temperatura da alimentação e o nível de líquido no ebulidor.

4.2 – Definição dos Requisitos Básicos

O objectivo principal desta operação unitária é a separação de duas ou mais substâncias líquidas com pontos de ebulição diferentes através do fornecimento de calor, de forma a vaporizar o componente mais volátil e posteriormente condensá-lo para que possa ser recolhido. O componente menos volátil é recolhido na forma líquida pela base do ebulidor.

A alimentação é introduzida na instalação pela base da unidade de alimentação através de uma bomba peristáltica. Nesta unidade, a alimentação é aquecida até uma temperatura que seja semelhante à temperatura do refluxo no ponto onde a alimentação entra na coluna de destilação (AdptCol-2). A alimentação ao entrar na coluna, contacta com o refluxo descendente que vem do condensador (Conds-2) e com o vapor ascendente proveniente do ebulidor (EB). A mistura que chega ao ebulidor é aquecida até à sua temperatura de ebulição, vaporizando o componente mais volátil. O componente menos volátil é eliminado pela base do ebulidor passando pelo tubo

angular, pelo condensador (Conds-1) e pela válvula de controlo proporcional, VC, sendo finalmente recolhido no tanque do resíduo (T_R). O arrefecimento no condensador (Conds-1) é feito através da circulação de uma corrente de água fria, no interior da serpentina do condensador.

O componente mais volátil vaporiza no ebulidor e sobe na forma de vapor ao longo da coluna de destilação contactando, no interior do enchimento, com o líquido descendente (refluxo). Quando o vapor atinge o topo da coluna de destilação, entra no condensador (Conds-2) e ao contactar com a superfície fria da serpentina condensa passando ao estado líquido. Este líquido condensado passa posteriormente por uma válvula electromagnética que faz a divisão do caudal de condensado em refluxo (líquido condensado que regressa à coluna) e destilado (líquido condensado que sai da instalação). Esta válvula regula o caudal de refluxo através de tempos de fecho e abertura. Se a válvula estiver fechada o líquido condensado regressa ao topo da coluna, se a válvula estiver aberta, o líquido condensado sai da coluna, passando ainda por um condensador (Conds-3) para que seja novamente arrefecido antes de ser recolhido no tanque do destilado (T_D).

4.3 – Estabelecimento de princípios básicos

A separação de misturas líquidas nos seus constituintes é uma das principais operações das indústrias químicas e petrolíferas, e a destilação é o método mais utilizado para se alcançar este objectivo. Quando se aquece um líquido, que contenha dois ou mais constituintes até ao seu ponto de ebulição, a composição do vapor será, normalmente, diferente da composição do líquido. É esta diferença na composição das duas fases em equilíbrio que constitui a base do processo de destilação, e por esta razão, é essencial conhecer os equilíbrios líquido-vapor.

Normalmente, o equilíbrio líquido-vapor é representado num Diagrama Temperatura/Composição (figura 4.2).

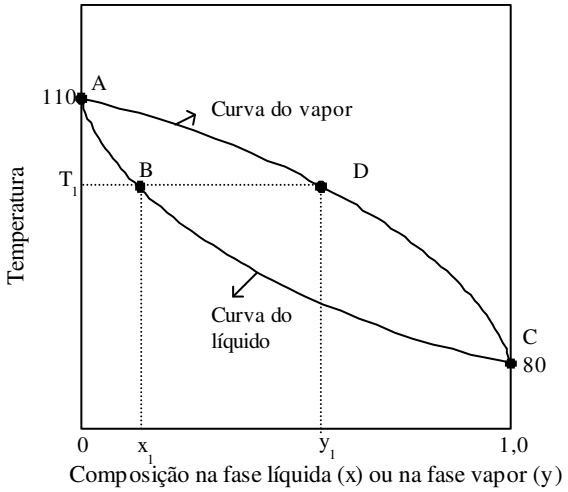


Figura 4.2 - Diagrama Temperatura/Composição

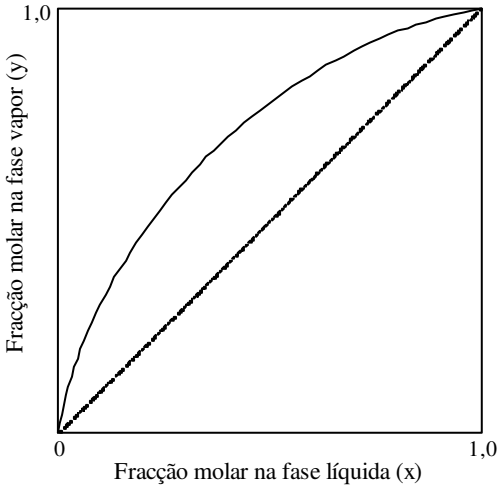


Figura 4.3 - Diagrama de fases

A curva **ABC** indica a composição do líquido em ebulição a uma determinada temperatura, e a curva **ADC** corresponde à composição do vapor a essa mesma temperatura. Assim, um líquido de composição $\mathbf{x_1}$ entrará em ebulição à temperatura $\mathbf{T_1}$ e o vapor em equilíbrio é dado pelo ponto **D** de composição $\mathbf{y_1}$.

Através do diagrama Temperatura-Composição verifica-se que, para qualquer composição de líquido x, o vapor formado será mais rico no componente mais volátil. Por vezes, torna-se mais prático fazer a representação de y em função de x, para uma pressão constante (figura 4.3), pois a maioria das destilações industriais realizam-se a uma pressão sensivelmente constante. No entanto, a temperatura varia ao longo de cada uma das curvas.

Para sistemas ditos normais, à medida que a concentração do componente menos volátil aumenta, o ponto de ebulição (temperatura à qual o líquido entra em ebulição) e o ponto de gotejamento (temperatura à qual o vapor condensa) também aumentam. Se os componentes da mistura apresentarem interacções físicas e químicas fortes, os diagramas de fases podem ser diferentes. Neste caso, existe um ponto crítico de composição em que a composição do líquido e do vapor é idêntica, e os componentes não podem ser separados à pressão atmosférica. Esta mistura é designada por Azeótropo.

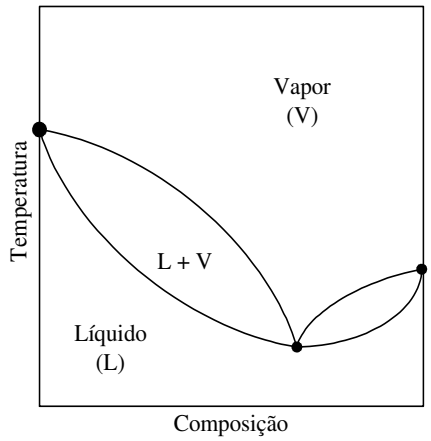


Figura 4.4 -Diagrama Temperatura/Composição de um azeótropo com ponto de ebulição mínimo

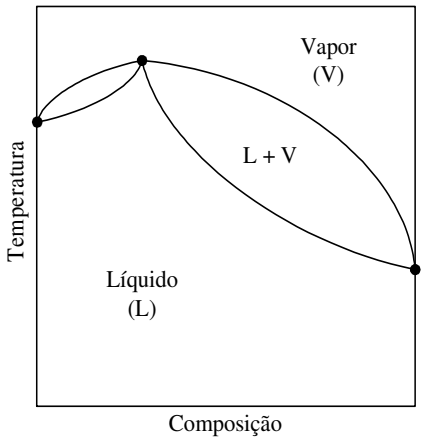


Figura 4.5 -Diagrama Temperatura/Composição de um azeótropo com ponto de ebulição máximo

Um azeótropo com ponto de ebulição mínimo, entra em ebulição a uma temperatura inferior do que os respectivos componentes puros (figura 4.4). Quando se pretende destilar um sistema deste tipo, o produto de topo é o azeótropo e o produto de base (resíduo) é o componente com maior ponto de ebulição, quando o componente mais volátil está presente em baixas concentrações. Por outro lado, quando o componente com menor ponto de ebulição (mais volátil) está presente em elevadas concentrações, o produto de base é o componente mais volátil.

Um azeótropo com ponto de ebulição máximo (figura 4.5), entra em ebulição a uma temperatura superior aos componentes puros, logo o azeótropo é eliminado pela base da coluna. O produto de topo é o componente menos volátil quando este está presente em elevadas concentrações. O produto de topo é o componente mais volátil, quando está presente em elevadas concentrações. Se ocorrer separação da fase líquida, a temperatura de ebulição da mistura, assim como a composição da fase vapor permanece constante até à eliminação de uma das fases líquidas. Nestas condições, a misturas dos 2 líquidos sairá pelo topo da coluna, enquanto os componentes sairão pela base da coluna, consoante a sua composição.

A relação entre a composição do vapor, y, e a composição do líquido, x, no equilíbrio pode também ser expressa em termos de volatilidade. A tendência que um componente tem para vaporizar é designada por k e determina-se da seguinte forma:

$$k_i = \frac{\text{fracção molar do componente } i \text{ na fase vapor}}{\text{fracção molar do componente } i \text{ na fase líquida}} = \frac{y_i}{x_i} \qquad \textbf{(Eq.4. 1)}$$

Se o valor de k_i for elevado, o componente tende a concentrar-se na fase vapor; se o valor de k_i for baixo, o componente tende a concentrar-se na fase líquida. Este valor de k_i depende da temperatura, pressão e composição. O valor de k pode ser função de duas destas variáveis: temperatura e pressão; pressão e composição ou temperatura e composição. A volatilidade relativa do componente i em relação a um componente j é dada por:

$$\alpha_{i,j} = \frac{k_i}{k_j} \qquad \textbf{(Eq.4. 2)}$$

Se a volatilidade relativa dos componentes for elevada, um dos componentes tem maior tendência a vaporizar relativamente ao outro, e a sua separação através da vaporização (destilação) de um dos componentes é fácil. Por outro lado, quando os componentes têm tendências de vaporização aproximadas (k's idênticos), a separação destes componentes por destilação torna-se difícil.

4.4 – Descrição do sistema e dos blocos funcionais associados

O sistema sobre o qual vai incidir a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) é uma coluna de destilação à escala piloto e todo o seu sistema de aquisição de dados e controlo do sistema.

No Anexo 1 (suporte digital "CD") encontra-se uma base de dados dos componentes analisados onde estes se encontram caracterizados. Esta base de dados foi desenvolvida no S*oftware Microsoft Access 2007*, onde são caracterizados cada um dos 326 componentes. Cada componente foi caracterizado em termos de:

- Número de ordem
- Referência
- Nome
- Subsistema
- Localização
- Função
- Descrição
- Principal modo de falha
- Efeito do modo de falha

- Probabilidade de ocorrência
- Severidade
- Medidas de mitigação/Manutenção preventiva
- Fornecedor
- Representante
- Código
- Fotografia

Como já foi mencionado no ponto 4.1, a coluna de destilação foi seccionada em 5 subsistemas e a estes há ainda a acrescentar o subsistema estrutura e o subsistema unidade de aquisição e controlo. O sistema é então constituído por:

1. Subsistema ebulição
2. Subsistema esgotamento
3. Subsistema alimentação
4. Subsistema rectificação
5. Subsistema condensação
6. Subsistema estrutura
7. Subsistema unidade de aquisição e controlo

Os primeiros 5 subsistemas são subsistemas específicos desta operação unitária, que foram assim divididos devido ao seu "papel" no processo da destilação.

De seguida, será feita uma descrição de cada um dos subsistemas.

4.4.1 – Subsistema Ebulição

A função do subsistema ebulição é elevar a temperatura da mistura a destilar até ao seu ponto de ebulição, com o objectivo de vaporizar o seu componente mais volátil, e eliminar o componente menos volátil (resíduo) pela base do ebulidor. A representação esquemática deste subsistema é a seguinte (figura 4.6):

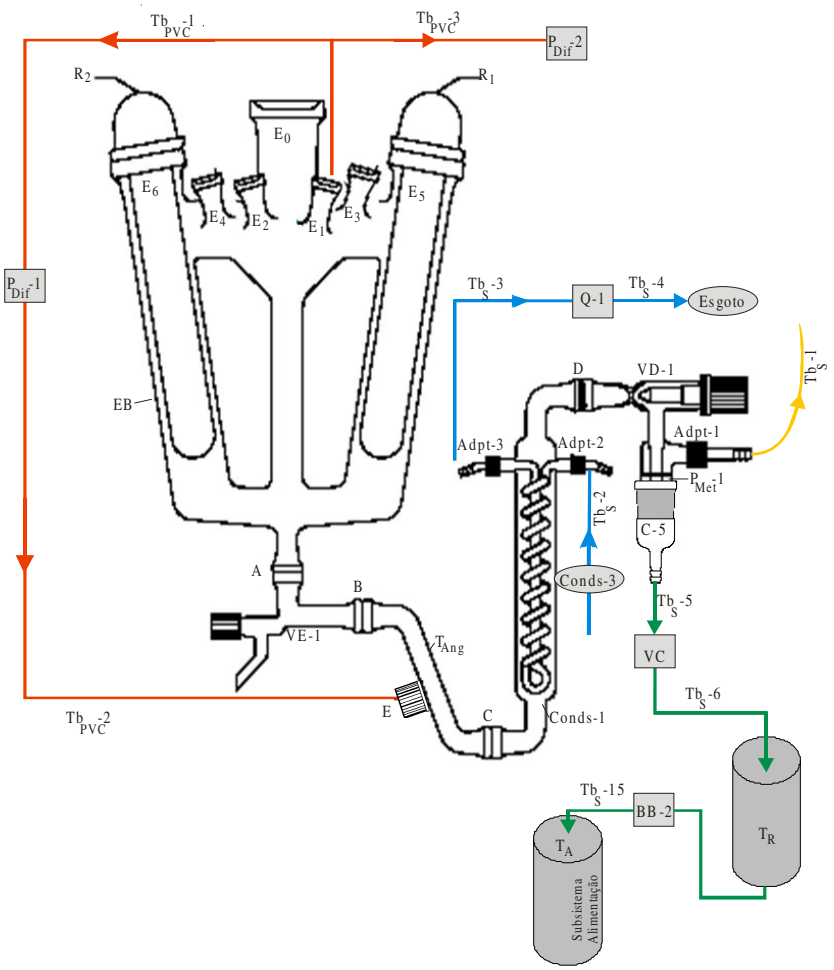


Figura 4. 6 - Representação esquemática do subsistema ebulição

A legenda da figura anterior é apresentada no quadro 4.1:

Quadro 4. 1 – Legenda da figura 4.6

Legenda	Descrição
R_1	Resistência de 2000W
R_2	Resistência de 2000W

Quadro 4.1 – Legenda da figura 4.6 (cont.)

Legenda	Descrição
E_0	Entrada de topo do ebulidor que estabelece ligação com o subsistema esgotamento através do Adaptador de Coluna (AdptCol-1) e onde se encontra ligado o seguinte material de união: – 2 flanges KF50: F_{50}-1; F_{50}-2 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-1; OR_{50}-2 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-1
E_1	Entrada frontal direita do ebulidor e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF15: F_{15}-17; F_{15}-18 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-17; OR_{15}-18 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-9 – 1 Toma dupla de pressão diferencial: TP_{Dif}-EB – 1 Conector de vidro: C-4 – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-4 – 2 Tubagens de PVC: Tb_{PVC}-1; Tb_{PVC}-3
E_2	Entrada frontal esquerda do ebulidor e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF15: F_{15}-19; F_{15}-20 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-19; OR_{15}-20 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-10 – 1 Termopar "duplo": TC-EB – 1 Conector de vidro: C-3 – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-3

Quadro 4.1 – Legenda da figura 4.6 (cont.)

Legenda	Descrição
E_3	Entrada traseira direita do ebulidor e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF15: F_{15}-1; F_{15}-2 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-1; OR_{15}-2 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-1 – 1 Sensor de nível mínimo: L_{Min} – 1 Conector de vidro: C-2 – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-1
E_4	Entrada traseira esquerda do ebulidor e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF15: F_{15}-3; F_{15}-4 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-3; OR_{15}-4 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-2 – 1 Sensor de nível máximo: L_{Max} – 1 Conector de vidro: C-1 – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-2
E_5	Entrada da resistência R_1, e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF50: F_{50}-3; F_{50}-4 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-3; OR_{50}-4 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-2

Quadro 4.1 – Legenda da figura 4.6 (cont.)

Legenda	Descrição
E_6	Entrada da resistência R_2, e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF50: F_{50}-5; F_{50}-6 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-5; OR_{50}-6 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-3
EB	Ebulidor
A	União entre o ebulidor e a válvula de base constituída por: – 2 flanges KF15: F_{15}-5; F_{15}-6 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-5; OR_{15}-6 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-3
B	União entre a válvula de base e o tubo angular constituída por: – 2 flanges KF15: F_{15}-7; F_{15}-8 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-7; OR_{15}-8 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-4
C	União entre o tubo angular e o condensador do resíduo constituída por: – 2 flanges KF15: F_{15}-9; F_{15}-10 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-9; OR_{15}-10 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-5

Quadro 4.1 – Legenda da figura 4.6 (cont.)

Legenda	Descrição
D	União entre o condensador, Conds-1, e a válvula de descarga VD-1, constituída por: – 2 flanges KF15: F_{15}-11; F_{15}-12 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-11; OR_{15}-12 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-6
E	Toma de pressão diferencial no tubo angular, T_{Ang}: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-5 – 1 Toma de pressão diferencial: TP_{Dif}-T_{Ang} – 1 Tubagem de PVC: Tb_{PVC}-2
VE-1	Válvula de esgotamento
T_{Ang}	Tubo angular
Conds-1	Condensador
Adpt-1	Adaptador de tubagem com rosca, da válvula de descarga VD-1, para eliminação de vapores
Adpt-2	Adaptador de tubagem com rosca, do condensador Conds-1, para entrada da água de refrigeração
Adpt-3	Adaptador de tubagem com rosca, do condensador Conds-1, para saída de água de refrigeração
VD-1	Válvula de descarga
T_R	Tanque do resíduo
VC	Válvula de controlo proporcional para controlo do nível de líquido no ebulidor
Q-1	Medidor de caudal de água de refrigeração

Quadro 4.1 – Legenda da figura 4.6 (cont.)

Legenda	Descrição
C-5	Conector de vidro, ligado à válvula VD-1 para eliminação do resíduo
P_{Met}-1	Pinça metálica para unir a válvula VD-1 e o conector C-5
Tb_S-1	Tubagem de silicone para eliminação de vapores
Tb_S-2	Tubagem de silicone para circulação de água de refrigeração
Tb_S-3	Tubagem de silicone para circulação de água de refrigeração
Tb_S-4	Tubagem de silicone para circulação de água de refrigeração
Tb_S-5	Tubagem de silicone para transportar o resíduo do conector C-5 até à válvula de controlo proporcional VC
Tb_S-6	Tubagem de silicone para transportar o resíduo da válvula de controlo proporcional VC até ao tanque do resíduo, T_R
Tb_S-17	Tubagem de silicone para transportar o resíduo do tanque do resíduo, T_R, até ao tanque de alimentação T_A, através da bomba peristáltica BB-2
BB-2	Bomba peristáltica
P_{Dif}-1	Sensor de pressão diferencial entre o topo e a base do ebulidor
P_{Dif}-2	Sensor de pressão diferencial entre o ebulidor e o topo da instalação (Conds-2)

O diagrama de blocos representado na figura 4.7 representa a relação existente entre o subsistema ebulição e o subsistema esgotamento.

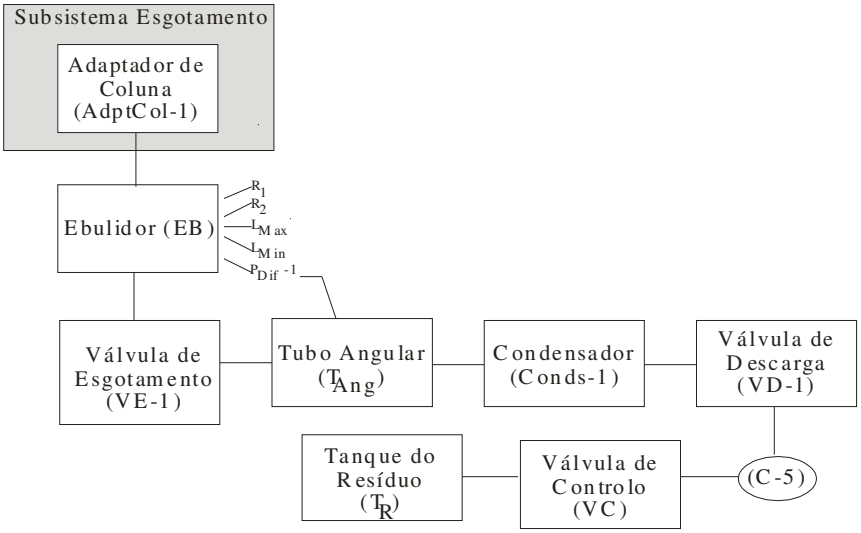


Figura 4. 7 - Diagrama de blocos representativo do subsistema ebulição

Este tipo de ebulidor é utilizado em destilações contínuas de grandes quantidades de misturas líquidas. O ebulidor (EB) é sustentado através de 2 garras metálicas (G-1 e G-2) fixas à estrutura através de 2 nozes (N-1 e N-2) e das flanges F_{50}-1 e F_{50}-2 que estão sustentadas nas barras Brr_{Fl50}-1, que fazem parte da estrutura.

O ebulidor possui 7 entradas, numeradas de 0 a 6 no topo, e uma saída na base. Das 7 entradas de topo, 3 destas são ligações do tipo KF50 e as restantes 4 são ligações do tipo KF15.

A entrada E_0 destina-se à ligação entre o ebulidor e o adaptador de coluna (AdptCol-1), ligação esta que é feita através das flanges F_{50}-1 e F_{50}-2 e respectivos O'Rings.

As entradas E_3 e E_4 destinam-se a adaptar os sensores de nível mínimo (L_{Min}) e máximo (L_{Max}), respectivamente, que fazem a ligação ao ebulidor através de conectores de vidro (C-2 e C-1) adequados para a ligação do tipo KF15. O nível de mistura no ebulidor deve manter-se entre os 2 sensores, cujo sinal, é enviado para a UAC, fazendo activar 2 alarmes consoante o volume da mistura ultrapasse o nível máximo, ou baixe ao nível mínimo.

Na entrada E_1 encontra-se inserido, através de um conector de vidro (C-4), duas tomas para a pressão diferencial no topo do ebulidor. Os sinais obtidos a partir dos sensores de pressão diferencial são enviados para a UAC, para ser possível a monitorização dos valores de pressão diferencial ao longo da coluna e da pressão diferencial correspondente ao nível de líquido no ebulidor.

Na entrada E_2 está ligado o termopar duplo (TC-EB) através do conector de vidro C-3, que permite a monitorização e controlo de temperatura no interior do ebulidor. O termopar duplo

encontra-se ligado ao controlador de temperatura, CTR-1 (que se encontra desactivado) e à UAC para monitorização.

As entradas E_5 e E_6 destinam-se a adaptar as resistências R_1 e R_2, em Quartzo, que ficarão imersas na mistura líquida. Cada uma das resistências tem uma potência de aquecimento de 2000W.

Na base do ebulidor encontra-se ligada uma válvula de esgotamento que permite esgotar o resíduo. No tubo angular existe uma toma de pressão que, juntamente com a toma de pressão no topo do ebulidor permitirá, através da pressão diferencial, controlar o nível de líquido no ebulidor por accionamento de uma válvula de controlo proporcional, VC. Antes do resíduo ser recolhido no tanque do resíduo, passa num condensador, onde será arrefecido. Este arrefecimento, é feito através da circulação de uma corrente de água fria, proveniente do condensador Conds-3, no interior da serpentina do condensador, Conds-1. A água de refrigeração entra no adaptador Adpt-2, percorre a serpentina e sai pelo adaptador Adpt-3, para o esgoto.

4.4.2 – Subsistema Esgotamento

A função principal do subsistema esgotamento é concentrar o componente menos volátil no líquido (resíduo) ou, por outras palavras, "esgotar" o componente mais volátil, pelo que o líquido nesta zona da coluna será mais concentrado no componente menos volátil.

O subsistema esgotamento comunica com o subsistema ebulição através da ligação entre o adaptador de coluna (AdptCol-1) e o ebulidor (EB), e comunica com o subsistema rectificação através do adaptador de coluna (AdptCol-2). A sua representação encontra-se na figura 4.8.

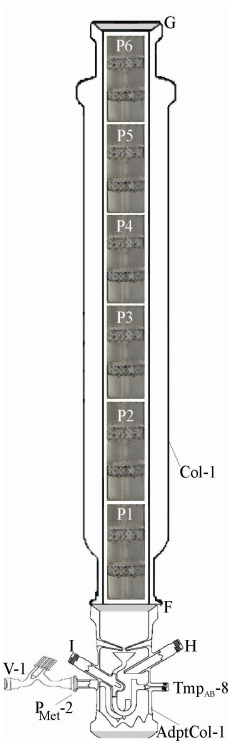


Figura 4.8 - Representação esquemática do subsistema esgotamento

A legenda da figura 4.8 é apresentada no quadro 4.2:

Quadro 4.2 - Legenda da figura 4.8

Legenda	Descrição
F	União entre o adaptador de coluna (AdptCol-1) e a coluna (Col-1) constituída por: – 2 flanges KF50: F_{50}-7; F_{50}-8 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-7; OR_{50}-8 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-4
G	União entre a coluna (Col-1) e o adaptador de coluna (AdptCol-2) e constituída por: – 2 flanges KF50: F_{50}-9; F_{50}-10 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-9; OR_{50}-10 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-5
H	Entrada lateral direita do adaptador de coluna (AdptCol-1) onde se encontra ligado o seguinte material: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-7 – Termopar: T-2
I	Entrada lateral esquerda do adaptador de coluna (AdptCol-1) onde se encontra ligado o seguinte material: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-6 – Termopar: T-1
V-1	Válvula de vidro
P_{Met}-2	Pinça metálica que promove a união entre a válvula V-1 e o adaptador de coluna (AdptCol-1)
Tmp_{AB}-8	Tampa roscada com abertura no topo
AdptCol-1	Adaptador de coluna
P-1 a P-6	6 Módulos de enchimento estruturado *Sulzer* 1900
Col-1	Coluna de vidro

O diagrama de blocos representado na figura 4.9 representa a relação existente entre o subsistema esgotamento e os subsistemas ebulição e rectificação.

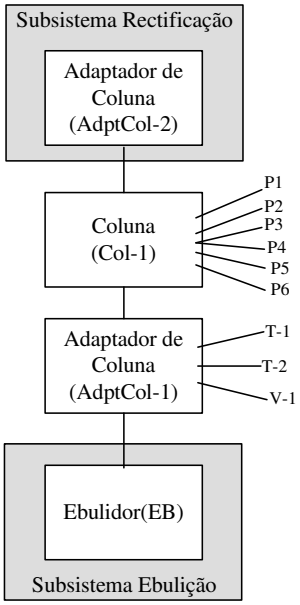


Figura 4.9 – Diagrama de blocos representativo do subsistema esgotamento

Este subsistema contém um adaptador de coluna (AdptCol-1) ligado ao ebulidor (subsistema de ebulição), onde se encontram instalados 2 termopares; o termopar T-1 que mede a temperatura do líquido que entra no adaptador de coluna (AdptCol-1), proveniente da coluna (Col-1) onde se dá o esgotamento do componente mais volátil; e o termopar 2 que mede a temperatura do vapor que entra no adaptador de coluna proveniente do ebulidor. Ambos os sinais dos termopares são enviados para a UAC, onde podem ser monitorizados os seus valores. No adaptador de coluna, AdptCol-1, existe ainda a possibilidade de recolher amostras de vapor e/ou aliviar a pressão do sistema através da válvula V-1, e recolher amostras de líquido através da tampa Tmp_{AB}-8.

Acoplado ao AdptCol-1, encontra-se uma coluna de vidro (Col-1) com 1000mm de altura e 43mm de diâmetro interno, sustentada à estrutura de suporte através da garra G-4, contendo no seu interior 6 secções de enchimento estruturado em malha de aço inoxidável do tipo estruturado *Mellapak* 1900 da *Sulzer* com 43mm de diâmetro e 165mm de comprimento. O papel deste enchimento é promover o máximo contacto entre o vapor ascendente e o líquido descendente ao longo da coluna. Ao longo da coluna ocorrem 2 fenómenos:

- Parte do componente menos volátil condensa do vapor ascendente para o líquido, aumentando a percentagem do componente mais volátil na fase vapor;

– Parte do componente mais volátil é vaporizado do líquido, diminuindo a concentração do componente mais volátil no líquido.

4.4.3 – Subsistema Alimentação

A principal função deste subsistema é fazer a admissão da alimentação a meio da coluna de destilação e com uma determinada temperatura e caudal. O subsistema alimentação comunica com o subsistema rectificação através da válvula V-2. O subsistema alimentação encontra-se representado na figura 4.10, estando a legenda da figura no quadro 4.3.

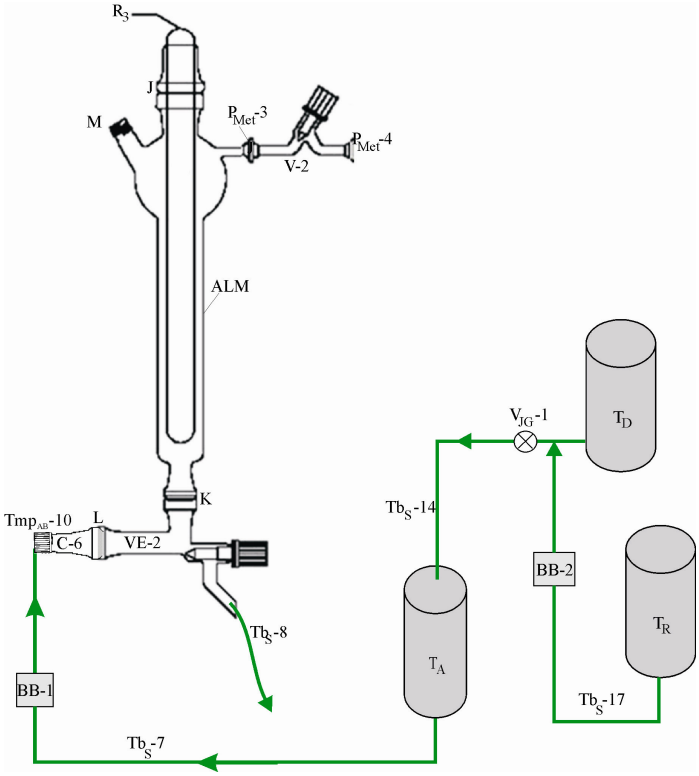


Figura 4.10 - Representação esquemática do subsistema alimentação

Quadro 4.3 - Legenda da figura 4.10

Legenda	Descrição
J	Entrada da resistência R_3, e onde se encontra ligado o seguinte material: – 2 flanges KF25: F_{25}-1; F_{25}-2 – 2 O'rings KF25: OR_{25}-1; OR_{25}-2 – 1 O'ring KF25 de Teflon: OR_{25PTFE}-1
K	União entre a unidade de alimentação (ALM) e a válvula (VE-2) constituída por: – 2 flanges KF15: F_{15}-15; F_{15}-16 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-15; OR_{15}-16 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-8
L	União entre a válvula de esgotamento (VE-2) e o conector (C-6) constituída por: – 2 flanges KF15: F_{15}-13; F_{15}-14 – 2 O'rings KF15: OR_{15}-13; OR_{15}-14 – 1 O'ring KF15 de Teflon: OR_{15PTFE}-7
M	Entrada lateral esquerda da unidade de alimentação (ALM) onde se encontra ligado o seguinte material: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-9 – Termopar "duplo" TC-ALM
R_3	Resistência de 1000W
P_{Met}-3	Pinça metálica
P_{Met}-4	Pinça metálica
V-2	Válvula de vidro

Quadro 4.3 - Legenda da figura 4.10 (cont.)

Legenda	Descrição
ALM	Unidade de alimentação
C-6	Conector
VE-2	Válvula de esgotamento
BB-1	Bomba peristáltica
Tmp_{AB}-10	Tampa roscada com abertura no topo
T_A	Tanque de alimentação
Tb_S-7	Tubagem de silicone para transportar a alimentação do tanque de alimentação T_A, até à unidade de alimentação, ALM
Tb_S-8	Tubagem de silicone para drenar a unidade de alimentação, ALM

O diagrama de blocos representado na figura 4.11 representa a relação existente entre o subsistema alimentação e o subsistema rectificação.

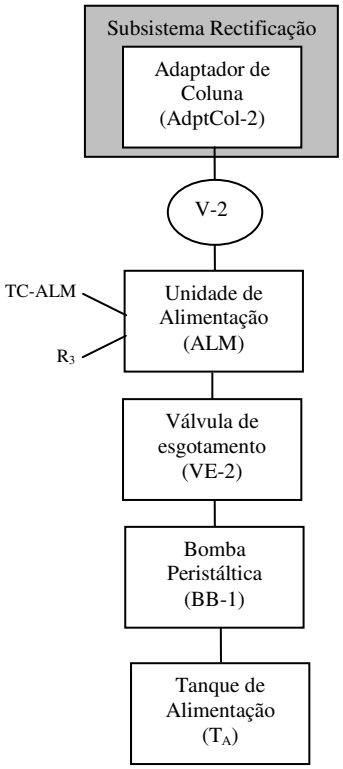


Figura 4.11 - Diagrama de blocos representativo do subsistema alimentação

No subsistema alimentação, o componente central é a unidade de alimentação (ALM), que se encontra suportada através da garra G-5 e da noz N-5 à estrutura de suporte. A alimentação é bombeada, com determinado caudal, recorrendo a uma bomba peristáltica, do tanque de alimentação até à válvula de esgotamento (VE-2) que por sua vez está ligada à base da unidade de alimentação. Na unidade de alimentação, a alimentação é aquecida até uma temperatura que seja semelhante à temperatura do refluxo no adaptador de coluna AdptCol-2. Este aquecimento é feito através de uma resistência, R_3, com uma potência de aquecimento de 1kW, que se encontra mergulhada no líquido de alimentação. A temperatura é controlada e monitorizada através da UAC. O controlo do caudal de alimentação é feito através da UAC, por accionamento da bomba peristáltica, BB-1.

A alimentação entra na coluna através da válvula, V-2, que na posição "aberta" permite a entrada da alimentação no Adaptador de Coluna, AdptCol-2, do subsistema rectificação.

4.4.4 – Subsistema Rectificação

A principal função do subsistema rectificação, é concentrar o componente mais volátil na fase vapor. O líquido de refluxo condensa o componente menos volátil, que se encontra presente na fase vapor.

O subsistema rectificação encontra-se entre os subsistemas condensação, alimentação e ebulição.

Este subsistema encontra-se representado na figura 4.12:

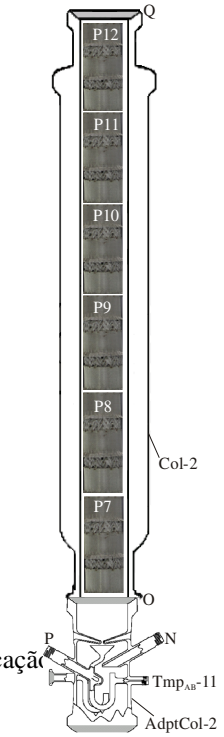


Figura 4.12 - Representação esquemática do subsistema rectificação

Quadro 4. 4 - Legenda da figura 4.12

Legenda	Descrição
N	Entrada lateral direita do adaptador de coluna (AdptCol-2) onde se encontra ligado o seguinte material: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-12 – Termopar: T-4

Quadro 4. 4 - Legenda da figura 4.12 (cont.)

Legenda	Descrição
O	União entre o adaptador de coluna (AdptCol-2) e a coluna de vidro (Col-2) constituída por: – 2 flanges KF50: F_{50}-11 F_{50}-12 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-11; OR_{50}-12 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-6
P	Entrada lateral esquerda da coluna de vidro (Col-2) onde se encontra ligado o seguinte material: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-13 – Termopar: T-3
Q	União entre a coluna de vidro (Col-2) e o condensador (Conds-2) constituída por: – 2 flanges KF50: F_{50}-13 F_{50}-14 – 2 O'rings KF50: OR_{50}-13; OR_{50}-14 – 1 O'ring KF50 de Teflon: OR_{50PTFE}-7
P-7 a P-12	6 Módulos de enchimento estruturado *Sulzer* 1900
Col-2	Coluna de vidro
Tmp_{AB}-11	Tampa roscada com abertura no topo
AdptCol-2	Adaptador de coluna

O diagrama de blocos representado na figura 4.13 representa a relação existente entre o subsistema rectificação e os subsistemas alimentação, esgotamento e condensação.

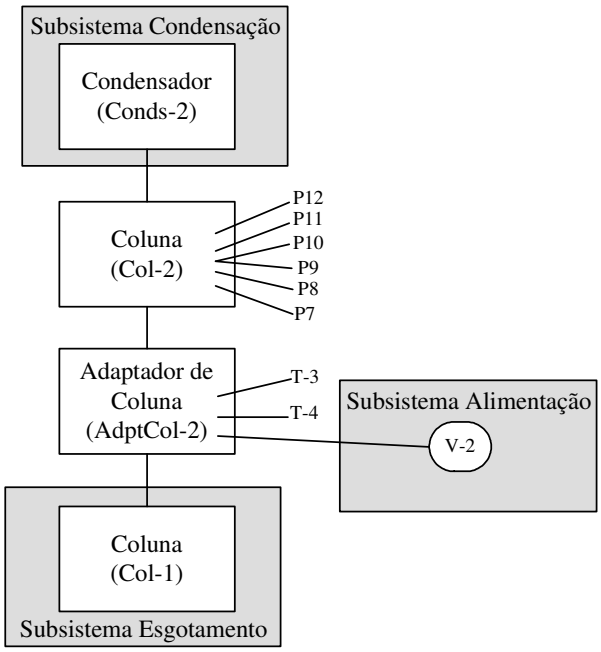


Figura 4.13 - Diagrama de blocos representativo do subsistema rectificação

Este subsistema contém um adaptador de coluna (AdptCol-2) ligado à coluna Col-1, que pertence ao subsistema esgotamento; à válvula V-2 que pertence ao subsistema alimentação; e à coluna Col-2. No AdptCol-2, encontram-se instalados 2 termopares do tipo K: o termopar T-3 mede a temperatura do líquido que entra no AdptCol-2 proveniente da coluna Col-2 (onde se dá o enriquecimento do vapor no componente mais volátil); o termopar T-4 que mede a temperatura do vapor que entra no AdptCol-2 proveniente da Col-1. Os sinais referentes aos termopares T-3 e T-4 são monitorizados através da UAC. No AdptCol-2 existe ainda a possibilidade de recolha de amostras de líquido através da tampa Tmp_{AB}-11, não sendo possível a recolha de amostra de vapor, como no AdptCol-1, pois no local de recolha desta amostra de vapor encontra-se a válvula V-2, por onde se faz a admissão da alimentação na coluna.

Unido ao AdptCol-2, encontra-se uma coluna de vidro Col-2, semelhante à Col-1. Neste caso, o papel do enchimento é promover o máximo contacto entre o vapor ascendente e o líquido descendente (refluxo). É durante este contacto entre o líquido e o vapor que se dá a transferência do componente mais volátil da fase líquida para a fase vapor, e do componente menos volátil presente na fase vapor para a fase líquida.

4.4.5 – Subsistema Condensação

A principal função deste subsistem é condensar todo o vapor que chega a este subsistema, e através de uma válvula electromagnética estabelecer a razão de refluxo. Por outras palavras, controlar o caudal de refluxo e o caudal de destilado. O subsistema condensação comunica com o subsistema rectificação, com o subsistema estrutura e com o subsistema Unidade de Aquisição e Controlo.

Este subsistema encontra-se representado na figura seguinte:

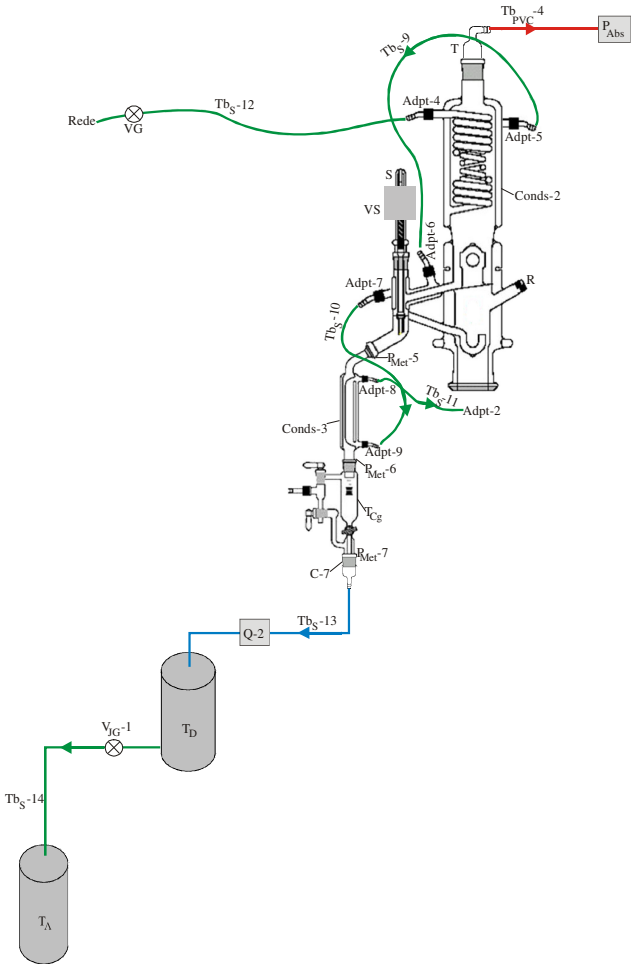


Figura 4.14 – Representação esquemática do subsistema condensação

Quadro 4. 5 – Legenda da figura 4.14

Legenda	Descrição
Adpt-4 a 9	Adaptadores de tubagem com rosca
R	Entrada lateral direita do Condensador (Conds-2) onde se encontra ligado o seguinte material: – 1 Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-14 – Termopar: T-5
S	Solenóide
$Caps_S$	Cápsula da válvula do solenóide
VS	Válvula do solenóide
Conds-2 a 3	Condensador
P_{Met}-5 a 7	Pinça metálica
C-7	Conector de vidro
T_{cg}	Tubo de carga
VG	Válvula de globo para regulação do caudal de refrigeração
T	Toma de pressão absoluta e pressão diferencial no condensador, Conds-2: – Toma de pressão diferencial: TP_{Dif}-Conds-2 – Tampa roscada com abertura no topo: Tmp_{AB}-15 – Conector de vidro: C-8 – Sensor de pressão absoluta: P_{ABS} – Tubagem em PVC: Tb_{PVC}-4
T_D	Tanque de destilado
Tb_S-9	Tubagem de silicone para transportar água de refrigeração do Adpt-5 para o Adpt-6
Tb_S-10	Tubagem de silicone para transportar água de refrigeração do Adpt-7 para o Adpt-9
Tb_S-11	Tubagem de silicone para transportar água de refrigeração do Adpt-8 para o Adpt-2 (Subsistema Ebulição)
Tb_S-12	Tubagem de silicone para transportar água de refrigeração da rede, passando pela válvula VG que regula o caudal, até ao Adpt-4

Quadro 4. 5 - Legenda da figura 4.14 (cont.)

Legenda	Descrição
Tb_S-13	Tubagem de silicone para transportar o destilado, passando pelo medidor de caudal, até ao tanque do destilado, T_D
Tb_S-14	Tubagem de silicone para transportar o destilado do tanque do destilado até ao tanque de alimentação para reciclo
V_{JG}-1	Válvula que permite controlar a passagem de destilado do T_D para o T_A
Q-2	Medidor de caudal de destilado

O diagrama de blocos representado na figura 4.15 representa a relação existente entre o subsistema condensação e o subsistema rectificação.

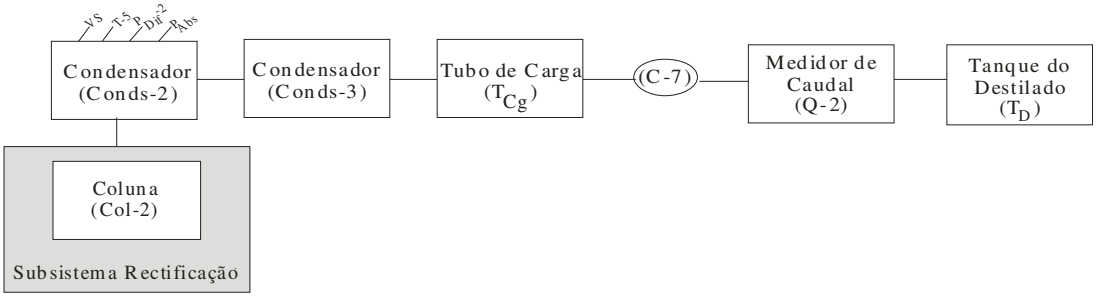


Figura 4. 15 - Diagrama de blocos representativo do subsistema condensação

Este subsistema tem uma unidade principal designada por condensador, Conds-2, que se encontra ligado ao subsistema rectificação através da coluna Col-2. Este condensador possui no seu interior uma serpentina dupla por onde circula uma corrente de água fria. A água entra no adaptador de tubagem Adpt-4 e sai pelo Adpt-5. Esta circulação de água fria no interior da serpentina irá provocar a condensação do vapor que entra no condensador. Este condensador possui um termopar do tipo K, que mede a temperatura do vapor que entra no condensador. No topo, possui um conector que permite a ligação ao sensor de pressão diferencial e pressão absoluta.

O líquido, proveniente da condensação do vapor, irá passar num canal onde é promovido o seu arrefecimento e a sua divisão. Divisão essa, feita através de uma válvula electromagnética solenóide. Se o êmbolo se encontra para cima (posição aberta), o líquido sai do Conds-2 e passa para o Conds-3, onde é novamente arrefecido, passa depois num tubo de carga e depois num

medidor de caudal e finalmente drenado para o tanque do destilado. Se o êmbolo se encontrar para baixo (posição fechado), o líquido é enviado novamente para o topo da coluna, passando a designar-se por refluxo.

A válvula electromagnética é constituída por um componente designado por solenóide (S) e pela respectiva válvula (VS). O número de vezes que a válvula actua e faz mover o solenóide, assim como os tempos de abertura e fecho são controlados através da unidade de aquisição e controlo (UAC). A válvula solenóide é revestida por uma cápsula de vidro, designada por cápsula da válvula de solenóide ($Caps_S$).

No condensador, Conds-3, e no canal que antecede a válvula electromagnética, a refrigeração é feita utilizando a circulação de uma corrente de água fria, numa camisa exterior. A água proveniente do Adpt-5, entra do Adpt-6, sai no Adpt-7, volta a entrar no Adpt-8 e a sair no Adpt-9.

4.4.6 – Subsistema Estrutura

A função deste subsistema é suportar a coluna de destilação com todos os seus componentes e acessórios. Trata-se de uma estrutura metálica em "grade" com 1m de largura na base, 0,5m de profundidade, 3,7m de altura e 0,5m de largura no topo. Este subsistema comunica com todos os outros subsistemas, à excepção da Unidade de Aquisição e Controlo.

Este subsistema é constituído pelos seguintes componentes:

Quadro 4. 6 - Legenda da figura 4.16

Legenda	Descrição
An-1 a 6	Anéis roscados
Brr0.5-1 a 18	Barras metálicas de 0,5m
Brr0.7-1 a 4	Barras metálicas de 0,7m
Brr1-1 a 16	Barras metálicas de 1m
BrrD0.5x0.7-1 a 2	Barra metálica diagonal 0,5x0,7
BrrD0.5x1-1 a 2	Barra metálica diagonal 0,5x1
BrrD0.7x1-1 a 2	Barra metálica diagonal 0,7x1
BrrFL50-1 a 2	Barras de suporte para ligações KF
Esf-1 a 20	Esferas Roscadas

Quadro 4. 6 - Legenda da figura 4.16 (cont.)

Legenda	Descrição
G-1 a 7	Garra metálica
N-1 a 6	Noz metálica
Bs-1	Base de suporte

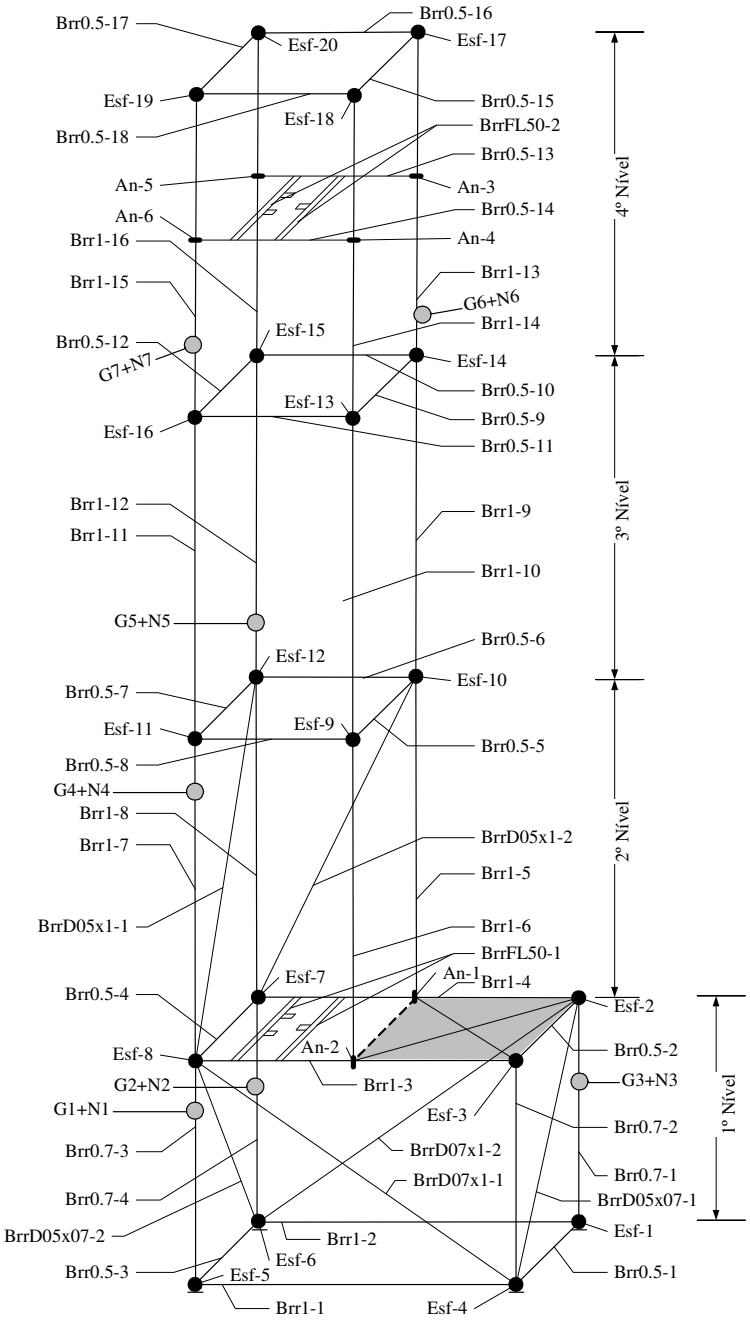


Figura 4. 16 - Representação esquemática do subsistema estrutura

Esta estrutura consiste num conjunto de barras posicionadas na vertical, horizontal e diagonal aparafusadas com elementos de ligação, nomeadamente, esferas roscadas e anéis roscados. A estrutura foi seccionada em 4 níveis para uma melhor localização dos elementos. Além dos componentes já mencionados, foi também incluído neste subsistema as garras metálicas e respectivas nozes que suportam alguns elementos da coluna de destilação à estrutura.

4.4.7 – Subsistema Unidade de Aquisição e Controlo

O subsistema unidade de aquisição e controlo, juntamente com a instrumentação instalada na coluna de destilação permitem a monitorização das temperaturas do líquido e do vapor ao longo da coluna, da pressão diferencial entre o topo e a base do ebulidor, da pressão diferencial entre o topo do ebulidor e o topo da instalação (Conds-2), da pressão absoluta no topo da coluna, do nível mínimo e máximo no ebulidor. Permite ainda controlar o caudal de alimentação, o caudal de refrigeração, a razão de refluxo, a temperatura de alimentação, a potência de aquecimento do ebulidor e o nível de líquido no ebulidor.

Este subsistema é constituído pelos seguintes componentes:

Quadro 4. 7 – Componentes da unidade de aquisição e controlo (UAC)

Legenda	Descrição
FP2000	Módulo *Field Point* 2000
FP-DO-400	Módulo *Field Point* DO-400
FP-TB-10/2	Módulo *Field Point* TB-10
FP-TC-120	Módulo *Field Point* TC-120
FP-TB-10/1	Módulo *Field Point* TB-10
FA24V	Fonte de alimentação 24V
Dsj-G	Disjuntor geral trifásico
Dsj-1	Disjuntor da resistência R_3
Dsj-2	Disjuntor da instrumentação

Quadro 4. 7 – Componentes da unidade de aquisição e controlo (UAC) (cont.)

Legenda	Descrição
Dsj-3	Disjuntor das bombas peristálticas
Dsj-4	Disjuntor da resistência R_1
Dsj-5	Disjuntor da resistência R_2
RLS-1	Relé de estado sólido
RLS-2	Relé de estado sólido da resistência R_3
RLS-3	Relé de estado sólido da resistência R_1
RLS-4	Relé de estado sólido da resistência R_2
Ctr-1	Controlador da resistência R_3
Ctr-2	Controlador das resistências R_1 e R_2
RL-1	Relé
RL-2	Relé
FA12V	Fonte de alimentação 12V
Ctc-1	Mini Motor Contactor
Ctc-2	Mini Motor Contactor
Int-1	Interruptor
QE	Quadro Eléctrico
FP-DI-DC	Módulo de entrada discreta com 2 canais 3-32 VDC
FP-AO-V10	Módulo de saída analógica de 2 canais 0-10V
FP-AI-V5/1	Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V

Quadro 4. 7 – Componentes da unidade de aquisição e controlo (UAC) (cont.)

Legenda	Descrição
FP-AI-V5/2	Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V
FP-AI-V5/3	Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V
FP-AO-V5B	Módulo de saída analógica de 2 canais -5-5V
FP-AO-C420	Módulo de saída analógica de 2 canais 4-20mA
FP-TC-K	Módulo de entrada de 2 canais de termopares K

O módulo *Field Point* 2000 é um módulo I/O com condicionamento de sinal e isolamento para ligação directa a sensores industriais como termopares, sensores de pressão, medidores de caudal e entradas e saídas digitais de 24V. Com este módulo de interface é possível desenvolver a aquisição e processamento de sinais e controlo, utilizando uma aplicação em *Labview*. É este módulo que estabelece a comunicação entre os sensores, os outros módulos *Field Point* e o computador, onde é desenvolvida a aplicação *Labview* e onde podem ser monitorizados os valores adquiridos e também efectuar o controlo de certas variáveis.

O módulo *Field Point* 400, é um módulo com oito canais de saída digitais, que pode ser utilizado para controlar sinais digitais de 5 a 30V. Este módulo tem a capacidade de fornecer uma corrente de 2A por canal. Todos os canais possuem um LED que indica o estado ON/OFF do canal. Os canais estão numerados de 0 a 7 e estão atribuídos às seguintes funções:

Quadro 4. 8 – Módulo *Field Point* FP-DO-400

Canal	Função
Canal 0	ON/OFF da válvula de actuação do solenóide
Canal 1	Fornecer a tensão de 220V às resistências R_1 e R_2
Canal 2	Fornecer a tensão de 220V à BB-1
Canal 3	ON/OFF da bomba peristáltica BB-1
Canal 4	Fornecer a tensão de 220V à resistência R_3

Quadro 4. 8 – Módulo *Field Point* FP-DO-400 (cont.)

Canal	Função
Canal 5	ON/OFF das resistências R_1 e R_2
Canal 6	Vazio
Canal 7	Vazio

O diagrama de blocos representado na figura 4.17 representa as ligações existentes entre o módulo FP-DO-400 com os diversos componentes electrónicos e instrumentação, com os quais estabelece comunicação.

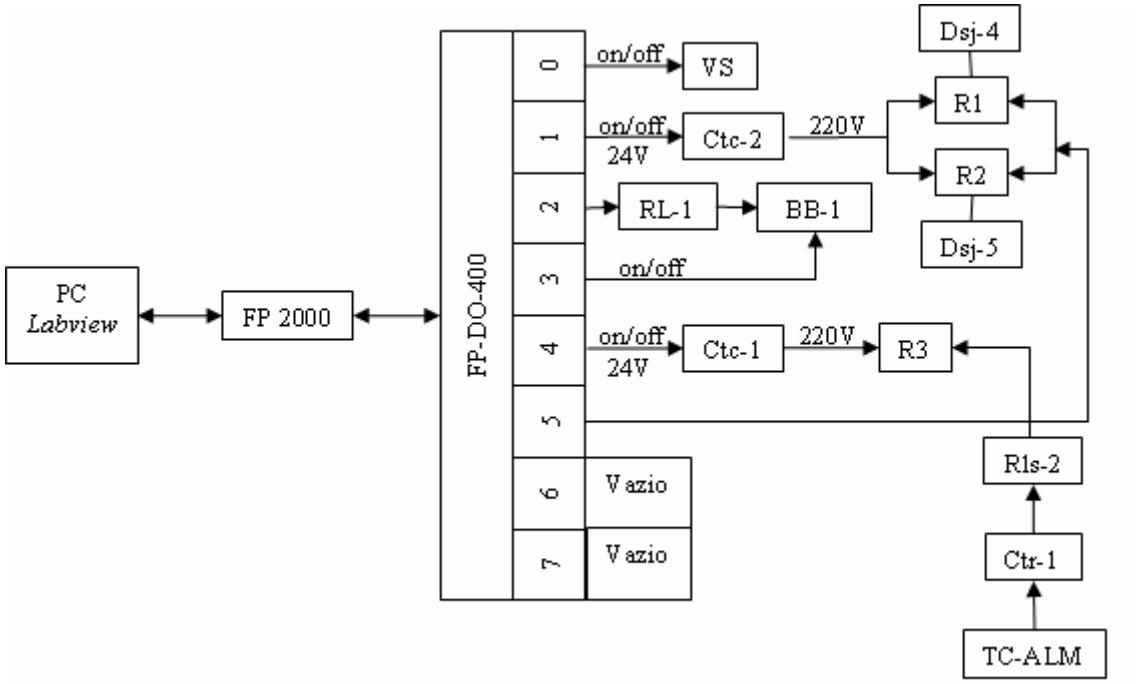


Figura 4.17 - Representação esquemática das ligações no módulo *Field Point* FP-DO-400

O módulo *Field Point* TB-10 consiste numa base para o sistema *Field Point* I/O. Este módulo possui doze canais numeradores de 0 a 11, e cada 2 canais são "atribuídos" a uma carta. O módulo *Field Point* FP-TB-10/2 possui as seguintes cartas, atribuídas às seguintes variáveis:

Quadro 4. 9 – Módulo *Field Point* FP-TB-10/2

Carta	Canal	Função
FP-DI-DC	Canal 0	Actuar o alarme de nível máximo (L_{Max})
	Canal 1	Actuar o alarme de nível mínimo (L_{Min})
FP-AO-V10	Canal 2	Definir a velocidade da bomba peristáltica, BB-1
	Canal 3	Definir a velocidade da bomba peristáltica, BB-2
FP-AI-V5/1	Canal 4	Aquisição de sinal correspondente à pressão diferencial entre o ebulidor e o topo da coluna, P_{Dif}-2
	Canal 5	Aquisição de sinal correspondente ao caudal de refrigeração, Q-1
FP-AI-V5/2	Canal 6	Aquisição de sinal correspondente à pressão absoluta, P_{ABS}
	Canal 7	Aquisição de sinal correspondente à pressão diferencial entre o topo e a base do ebulidor, P_{Dif}-1 (nível de líquido no ebulidor)
FP-AI-V5/3	Canal 8	Aquisição de sinal correspondente ao caudal de destilado, Q-2
	Canal 9	Vazio
FP-AO-V5B	Canal 10	Definir a posição da válvula de controlo proporcional, VC
	Canal 11	Vazio

O diagrama de blocos representado na figura 4.18 representa as ligações existentes entre o módulo FP-TB-10/2 com os diversos componentes electrónicos, instrumentação e equipamento com os quais estabelece comunicação.

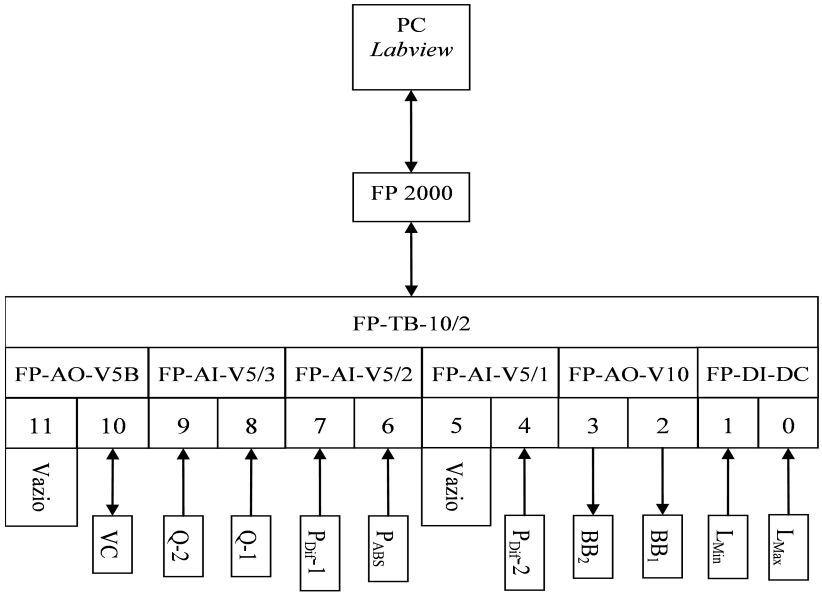


Figura 4.18 - Representação esquemática das ligações no módulo *Field Point* FP-TB-10/2

O módulo *Field Point* FP-TB-10/1 possui apenas 2 cartas instaladas, atribuídas às seguintes variáveis apresentadas no quadro 4.10.

Quadro 4. 10 – Módulo *Field Point* FP-TB-10/1

Carta	Canal	Função
FP-AO-C420	Canal 0	Definir a posição da válvula de globo, VG
	Canal 1	Vazio
FP-TC-K	Canal 2	Vazio
	Canal 3	Vazio

O diagrama de blocos representado na figura 4.19 representa as ligações existentes entre o módulo FP-TB-10/1 com a válvula de globo.

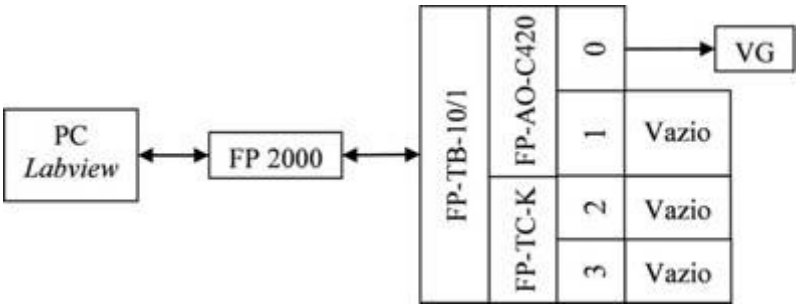


Figura 4.19 - Representação esquemática das ligações no módulo *Field Point* FP-TB-10/1

O módulo *Field Point* TC-120, é um módulo com 8 canais de entrada para medição directa de temperatura a partir de termopares do tipo Y, K, T, N, R, S, E e B. Os canais estão numerados de 0 a 7, e estão atribuídos aos seguintes termopares, todos do tipo K:

Quadro 4. 11 – Módulo *Field Point* FP-TC-120

Canal	Função
Canal 0	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do vapor do Conds-2, T-5
Canal 1	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do líquido no AdptCol-2, T-3
Canal 2	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do líquido no AdptCol-1, T-1
Canal 3	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do líquido no ebulidor, TC-EB
Canal 4	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do líquido na alimentação, TC-ALM
Canal 5	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do vapor no AdptCol-1, T-2
Canal 6	Aquisição de sinal correspondente à temperatura do vapor no AdptCol-2, T-4
Canal 7	Vazio

O diagrama de blocos representado na figura 4.20 representa as ligações existentes entre o módulo FP-TC-120 com os diversos termopares instalados na instalação.

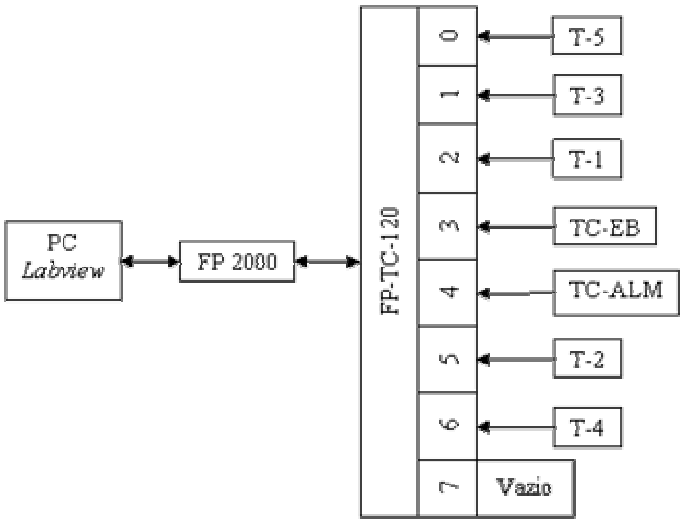


Figura 4.20 - Representação esquemática das ligações no módulo *Field Point* FP-TC-120

O esquema geral da unidade de aquisição e controlo é o que se encontra representado na figura 4.21.

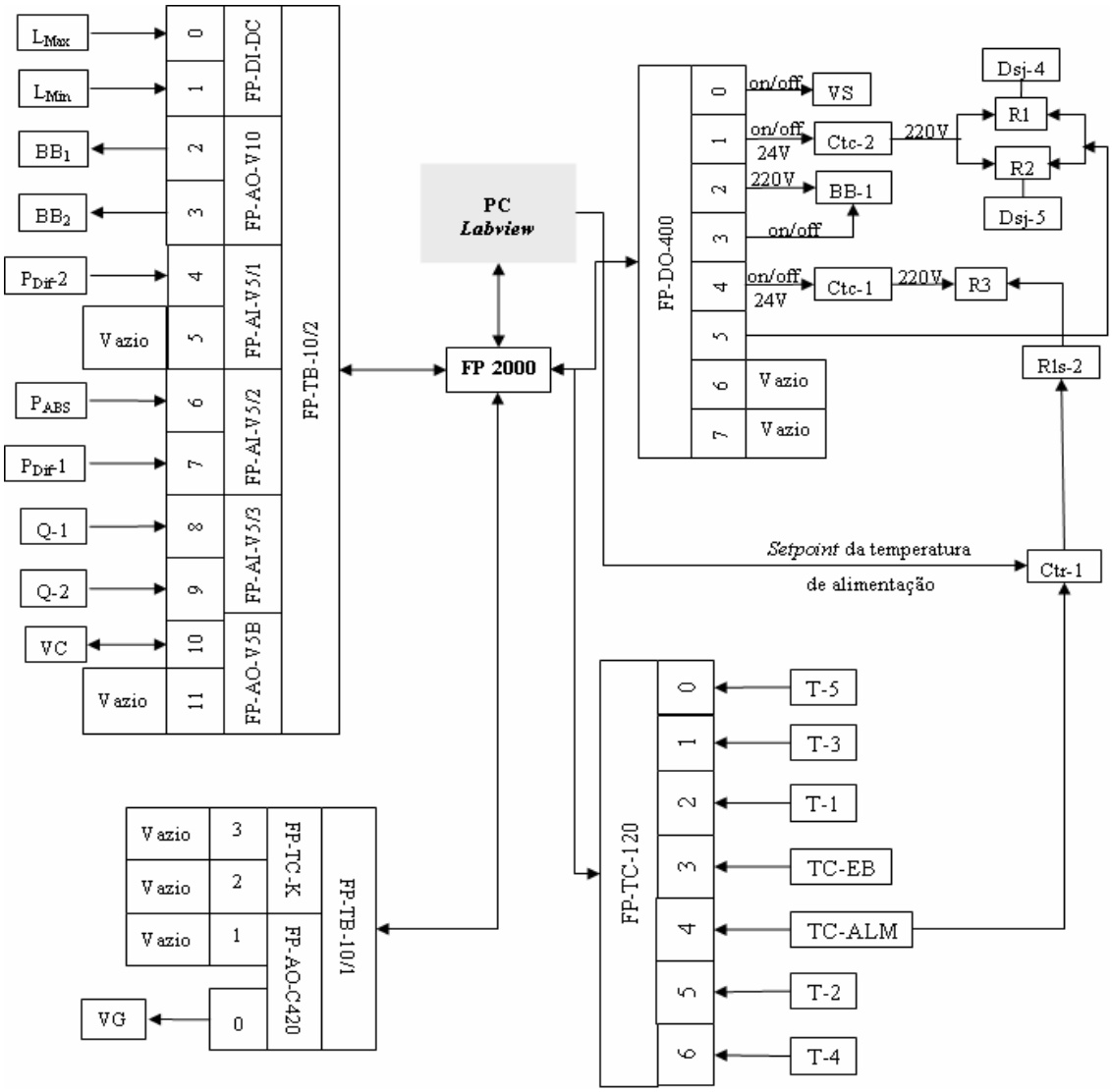


Figura 4.21 - Representação esquemática geral da unidade de aquisição e controlo

4.5 – Análise FMEA

A análise do principal modo de falha e grau de severidade dos componentes encontra-se documentada no Anexo 2 (suporte digital "CD"), e foi desenvolvida tendo em consideração o quadro 2.18 e 2.19 do capítulo 2. O anexo 2 foi desenvolvido no *Software Microsoft EXCEL* onde foi elaborada uma folha de cálculo que inclui parte da informação contida no Anexo 1 (base de dados), nomeadamente identificação do componente (n.º de ordem, designação e referência), função do componente, principal modo de falha do componente, efeito do modo de falha do componente, probabilidade de ocorrência do modo de falha, severidade do efeito do

modo de falha e medidas de mitigação/manutenção preventiva do modo de falha. A conjugação dos parâmetros Probabilidade de Ocorrência e Grau de Severidade foi feita utilizando o quadro de criticidade 2.20. Na tabela do Anexo 2 (suporte digital "CD") encontra-se assinalado a laranja os modos de falha críticos.

De seguida apresentam-se apenas os modos de falha críticos, durante o funcionamento da coluna de destilação, cuja probabilidade de ocorrência e grau de severidade sejam (C_F, 4), (D_F, 3) e (D_F, 4). Foram também considerados modos de falha que, apesar de não serem críticos devido a possuírem uma Probabilidade de Ocorrência "Muito Improvável" são fundamentais para o processo e a sua falha põe em causa todo o funcionamento do sistema.

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
01	Resistência de 2000W	R_1	- Aquecer a mistura a destilar	Falta de corrente	Não aquecimento da mistura	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Não Desliga	Aquecimento excessivo da mistura	B_F	4_F	Testar o circuito eléctrico das resistência R_1, semestralmente
02	Resistência de 2000W	R_2	- Aquecer a mistura a destilar	Falta de corrente	Não aquecimento da mistura	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Não Desliga	Aquecimento excessivo da mistura	B_F	4_F	Testar o circuito eléctrico das resistência R_1, semestralmente
31	Sensor de nível mínimo	L_{Min}	- Alertar o sistema quando o líquido no interior do ebulidor atinge o nível mínimo	Falta de corrente	Sensor não responde	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
					Nível de líquido no ebulidor poderá ser inferior ao nível mínimo		4_F	
39	Sensor de nível máximo	L_{Max}	- Alertar o sistema quando o líquido no interior do ebulidor atinge o nível máximo	Falta de corrente	Sensor não responde	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
					Nível de líquido no ebulidor poderá ultrapassar o nível máximo		4_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
84	Válvula de controlo	VC	- Controlar o nível de líquido no ebulidor	Falta de corrente	Nível de líquido no ebulidor não conforme com o imposto	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
					Nível de líquido no ebulidor excessivo		4_F	
					Nível de líquido no ebulidor insuficiente		4_F	
				Sobrecarga de corrente	Nível de líquido no ebulidor não conforme com o imposto	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
					Nível de líquido no ebulidor excessivo		4_F	
					Nível de líquido no ebulidor insuficiente		4_F	
				Danificação do circuito eléctrico da válvula	Nível de líquido no ebulidor não conforme com o imposto	B_F	4_F	Testar o circuito eléctrico semestralmente
					Nível de líquido no ebulidor excessivo		4_F	
					Nível de líquido no ebulidor insuficiente		4_F	
				Deterioração do corpo da válvula	Nível de líquido no ebulidor não conforme com o imposto	B_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Nível de líquido no ebulidor excessivo		4_F	
					Nível de líquido no ebulidor insuficiente		4_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
89	Tubagem em silicone	Tb_S-2	- Circulação de água de refrigeração	Tubagem "esmagada"	Aumento da pressão no circuito da água de refrigeração	DF	3F	Inspecção visual
90	Tubagem em silicone	Tb_S-3	- Circulação de água de refrigeração	Tubagem "esmagada"	Aumento da pressão no circuito da água de refrigeração	D_F	3_F	Inspecção visual
91	Tubagem em silicone	Tb_S-4	- Eliminar a àgua de refrigeração (esgoto)	Tubagem "esmagada"	Aumento da pressão no circuito da água de refrigeração	D_F	3_F	Inspecção visual
92	Tubagem em silicone	Tb_S-5	- Transportar o resíduo do conector C-5 até à válvula de controlo, VC	Tubagem "esmagada"	Resíduo acumulado no ebulidor	D_F	4_F	Inspecção visual
93	Tubagem em silicone	Tb_S-6	- Transportar o resíduo da válvula de controlo, VC, até ao tanque do resíduo, TR	Tubagem "esmagada"	Aumento da pressão na tubagem	D_F	3_F	Inspecção visual
94	Tubagem em silicone	Tb_S-7	- Transportar o resíduo do TR, passar pela bomba BB-2, até ao tanque de alimentação, TA	Deterioração do material por acção mecânica	Fuga	D_F	2_F	Verificação visual dos componentes (com a unidade em funcionamento e com a unidade parada) semestralmente e sua substituição caso exista deformação ou alteração de dimensões
					Perda do resíduo		4_F	
				Tubagem "esmagada"	Aumento da pressão na tubagem	D_F	3_F	Inspecção visual

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
95	Bomba peristáltica	BB-2	- Transportar o resíduo do T_R até ao tanque de alimentação, T_A	Falta de corrente	Não funciona	B_F	2_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Não funciona	B_F	2_F	Instalação de uma UPS
				Informação incorrecta do utilizador	Condições de operação de acordo com as instruções introduzidas	C_F	2_F	Verificar a coerência das instruções fornecidas
96	Sensor de pressão diferencial	P_{Dif}-1	- Fornecer o valor da pressão diferencial entre a base e o topo do ebulidor	Falta de corrente	Não funciona	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Não funciona	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Deterioração do material por acção química	Não funciona ou funciona incorrectamente	D_F	4_F	Material de constituição do sensor resistente ao(s) agente(s) químico(s) utilizados
				Deterioração do material por acção do calor	Não funciona ou funciona incorrectamente	D_F	4_F	Refrigeração do circuito prévio à entrada do sensor de pressão
97	Sensor de pressão diferencial	P_{Dif}-2	- Fornecer o valor da pressão diferencial entre o ebulidor e o condensador Conds-2	Falta de corrente	Não funciona	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Não funciona	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Deterioração do material por acção química	Não funciona ou funciona incorrectamente	D_F	4_F	Material de constituição do sensor resistente ao(s) agente(s) químico(s) utilizados
				Deterioração do material por acção do calor	Não funciona ou funciona incorrectamente	D_F	4_F	Refrigeração do circuito prévio à entrada do sensor de pressão

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
139	Termopar duplo	TC-ALM	- Medir a temperatura da alimentação	Falta de corrente	Sem valor de temperatura	B_F	3_F	Instalação de uma UPS
				"Descalibrado"	Valor de temperatura incorrecto	B_F	3_F	Verificação semestral das temperaturas utilizando 2 temperaturas de referência (0ºC e 100ºC)
140	Resistência de 1000W	R_3	- Aquecer a alimentação	Falta de corrente	Não aquecimento da mistura	B_F	3_F	Instalação de uma UPS
				Não Desliga	Aquecimento excessivo da mistura	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
147	Bomba peristáltica	BB-1	- Transportar a alimentação do tanque de alimentação, T_A, até à unidade de alimentação, ALM, com determinado caudal	Falta de corrente	Não funciona	B_F	3_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Não funciona	B_F	3_F	Instalação de uma UPS
				Informação incorrecta do utilizador	Condições de operação de acordo com as instruções introduzidas	C_F	3_F	Verificar a coerência das instruções fornecidas
150	Tubagem em silicone	Tb_S-7	- Transportar a alimentação do tanque de alimentação até ao conector C-6	Deterioração do material por acção mecânica	Fuga	D_F	2_F	Verificação visual dos componentes (com a unidade em funcionamento e com a unidade parada) semestralmente e sua substituição caso exista deformação ou alteração de dimensões
					Perda da alimentação		4_F	
				Tubagem "esmagada"	Alimentação não é bombeada, não chegando à unidade de alimentação	D_F	4_F	Inspecção visual, semestral

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
183	Válvula solenóide	VS	- Regular a razão de refluxo	Quebra	Falha na regulação da razão de refluxo	B_F	3_F	Inspecção visual, semestral
					Destilado não é eliminado		3_F	Inspecção visual, semestral
184	Solenóide	S	- Regular a razão de refluxo	Falha na resposta da válvula ao sinal eléctrico	Alteração da razão de refluxo com consequente alteração do caudal de destilado e do caudal de refluxo	B_F	3_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
				Falta de corrente		B_F	3_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente		B_F	3_F	Instalação de uma UPS
185	Cápsula da válvula solenóide	$Caps_S$	- Invólucro da válvula solenóide	Quebra	Falha na regulação da razão de refluxo	B_F	3_F	Inspecção visual, semestral
195	Sensor de pressão absoluta	P_{ABS}	- Medir a pressão absoluta no Conds-2	Falta de corrente	Não funciona	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Não funciona	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Deterioração do material por acção química	Não funciona ou funciona incorrectamente	D_F	4_F	Material de constituição do sensor resistente ao(s) agente(s) químico(s) utilizados
				Deterioração do material por acção do calor	Não funciona ou funciona incorrectamente	D_F	4_F	Refrigeração do circuito prévio à entrada do sensor de pressão
198	Tubagem em silicone	Tb_S-9	- Fazer a circulação do líquido de refrigeração do Adpt-5 para o Adpt-6	Tubagem "esmagada"	Dificuldade na circulação do líquido de refrigeração	D_F	3_F	Inspecção visual, semestral
					Aumento da pressão na tubagem		3_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
199	Tubagem em silicone	Tb_S-10	- Fazer a circulação do líquido de refrigeração do Adpt-7 para o Adpt-9	Tubagem "esmagada"	Dificuldade na circulação do líquido de refrigeração	D_F	3_F	Inspecção visual, semestral
					Aumento da pressão na tubagem		3_F	
200	Tubagem em silicone	Tb_S-11	- Fazer a circulação do líquido de refrigeração do Adpt-8 para o Adpt-2 (subsistema ebulição)	Tubagem "esmagada"	Dificuldade na circulação do líquido de refrigeração	D_F	3_F	Inspecção visual, semestral
					Aumento da pressão na tubagem		3_F	
201	Tubagem em silicone	Tb_S-12	- Transportar a água de refrigeração da "rede" até ao Adpt-4	Tubagem "esmagada"	Dificuldade na circulação do líquido de refrigeração	D_F	3_F	Inspecção visual, semestral
					Aumento da pressão na tubagem		3_F	
202	Tubagem em silicone	Tb_S-13	- Transportar o destilado do conector C-7 até ao tanque do destilado T_D	Tubagem "esmagada"	Acumulação de destilado no tubo de carga	D_F	4_F	Inspecção visual, semestral
203	Tubagem em silicone	Tb_S-14	- Transportar o destilado do tanque do destilado, T_D, para o tanque de alimentação T_A	Tubagem "esmagada"	Acumulação de destilado no T_D	D_F	4_F	Inspecção visual, semestral
204	Medidor de caudal	Q-2	- Medir o caudal de destilado	Falta de corrente	Sem sinal	B_F	2_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Sem sinal	B_F	2_F	Instalação de uma UPS
					Sinal constante		2_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
278	Garra metálica	G-1	- Sustentar o ebulidor à estrutura da instalação	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação do ebulidor	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Má sustentação da coluna		4_F	
279	Garra metálica	G-2	- Sustentar o ebulidor à estrutura da instalação	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação do ebulidor	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Má sustentação de toda a estrutura de vidro		4_F	
280	Garra metálica	G-3	- Sustentar o tubo angular, o condensador Conds-1, e a válvula de descarga VD-1	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação do conjunto T_{Ang}+Conds-1+VD-1	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Possibilidade de quebra do T_{Ang}; do Conds-1 e da VD-1		4_F	
281	Garra metálica	G-4	- Sustentar a Col-1	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação da Col-1	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Má sustentação de toda a estrutura de vidro		4_F	
282	Garra metálica	G-5	- Sustentar a unidade de alimentação, ALM	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação da ALM	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Possibilidade de quebra da ALM		4_F	
283	Garra metálica	G-6	- Sustentar o tubo de carga, T_{Cg} e o Condensador Conds-3	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação do T_{Cg}+Conds-3	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Possibilidade de quebra do T_{Cg}+Conds-3		4_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
284	Garra metálica	G-7	- Sustentar a Col-2	Descolagem da cortiça que reveste o interior da zona de aperto	Má sustentação da Col-2	C_F	4_F	Inspecção visual, semestral
					Má sustentação de toda a estrutura de vidro		4_F	
293	Módulo *Field Point* 2000	FP2000	- Estabelece a comunicação entre o computador e os outro módulos *Field Point*	Falta de corrente	Falha na comunicação entre os diversos módulos	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Falha na comunicação entre os diversos módulos	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
294	Módulo *Field Point* DO 400	FP-DO-400	- *On/off* do solenóide; - Fornecer a tensão de 220V às resistências R1 e R2; - Fornecer a tensão de 220V à bomba BB-1; - On/off da bomba BB-1; - Fornecer a tensão de 220V à resistência R3; - On/off das resistências R1 e R2	Falta de corrente	Razão de refluxo não controlada	B_F	3_F	Instalação de uma UPS
					Não aquecimento da mistura		3_F	
					Não aquecimento da alimentação		3_F	
					Caudal de alimentação nulo		4_F	
				Sobrecarga de corrente	Razão de refluxo não controlada	B_F	3_F	Instalação de uma UPS
					Alteração no aquecimento da mistura		3_F	
					Alteração no aquecimento da alimentação		3_F	
					Alteração do caudal de alimentação		4_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
295	Módulo *Field Point* TB-10	FP-TB-10/2	- Módulo com entradas e saídas e onde se encontram ligadas as cartas FP-DI-DC; FP-AOV10; FP-AI-V5/1; FP-AI-V5/2; FP-AI-V5/3; FP-AO-V5B	Falta de corrente	Falha na comunicação entre o módulo e as cartas	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Falha na comunicação entre o módulo e as cartas	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
296	Módulo *Field Point* TC-120	FP-TC-120	- Permite a aquisição de sinal de termopares	Falta de corrente	Falha no envio de sinal dos termopares para o módulo	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Falha no envio de sinal dos termopares para o módulo	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
297	Módulo *Field Point* TB-10	FP-TB-10/21	- Módulo com entradas e saídas e onde se encontra ligada a carta FP-AO-C420	Falta de corrente	Falha na comunicação entre o módulo e a carta	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Falha na comunicação entre o módulo e a carta	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
298	Fonte de alimentação 24V	FA24V	- Alimentar os componentes que necessitam de 24V	Falta de corrente	Falha de todos os componentes que necessitam de 24V	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Danificação de todos os componentes que são alimentados a partir da FA24V	B_F	4_F	Instalação de uma UPS
309	Controlador	Ctr-1	- Controlar a resistência R_3, para ajustar o *setpoint* da temperatura da alimentação	Problemas no circuito eléctrico do Ctr-1 até à R_3	*Setpoint* da temperatura da alimentação não alcançado	B_F	3_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
318	Módulo de entrada discreta com 2 canais 3-32 VDC	FP-DI-DC	- Actuar o alarme de nível máximo	Falha na comunicação entre o FP-DI-DC e o sensor de nível, L_{Max}	Informação incorrecta do nível de líquido no ebulidor	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
					Nível de liquido no ebulidor excessivo		4_F	
			- Actuar o alarme de nível mínimo	Falha na comunicação entre o FP-DI-DC e o sensor de nível, L_{Min}	Informação incorrecta do nível de líquido no ebulidor	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
					Nível de líquido no ebulidor insuficiente		4_F	
319	Módulo de saída analógica de 2 canais 0-10V	FP-AO-V10	- Definir a velocidade da bomba BB-1	Falha na comunicação entre o FP-AO-V10 e a bomba, BB-1	Caudal imposto à bomba BB-1 excessivo	B_F	3_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
					Caudal imposto à bomba BB-1 insuficiente		2_F	
					Caudal imposto à bomba BB-1 nulo		3_F	
			- Definir a velocidade da bomba BB-2	Falha na comunicação entre o FP-AO-V10 e a bomba, BB-2	Caudal imposto à bomba BB-2 excessivo	B_F	2_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
					Caudal imposto à bomba BB-2 insuficiente		2_F	
					Caudal imposto à bomba BB-2 nulo		2_F	

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
320	Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V	FP-AI-V5/1	- Aquisição de sinal correspondente à pressão diferencial entre o ebulidor e o topo da coluna, P_{Dif}-2	Falha na comunicação entre o FP-AI-V5/1 e o sensor de pressão, P_{Dif}-2	Informação incorrecta da pressão diferencial entre a base e o topo da coluna	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
			- Aquisição de sinal correspondente ao caudal de refrigeração, Q-1	Falha na comunicação entre o FP-AI-V5/1 e o medidor de caudal,Q-1	Informação incorrecta do caudal de refrigeração	B_F	2_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
321	Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V	FP-AI-V5/2	- Aquisição de sinal correspondente à pressão absoluta, P_{ABS}, na coluna,	Falha na comunicação entre o FP-AI-V5/2 e o sensor de pressão P_{ABS}	Informação incorrecta da pressão absoluta na coluna	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
			- Aquisição de sinal correspondente à pressão diferencial entre o topo e a base do ebulidor, P_{Dif}-1	Falha na comunicação entre o FP-AI-V5/2 e o sensor de pressão P_{Dif}-1	Informação incorrecta da pressão diferencial entre o topo e a base do ebulidor	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
322	Módulo de entrada analógica de 2 canais 0-5V	FP-AI-V5/3	- Aquisição de sinal correspondente ao caudal de destilado, Q-2	Falha na comunicação entre o FP-AI-V5/3 e o medidor de caudal,Q-2	Informação incorrecta do caudal de destilado	B_F	2_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente

Quadro 4. 12 – Modos de falha críticos (cont.)

Identificação do Componente			Função	Principal Modo de Falha	Efeito do Modo de Falha	P.O	S	Medidas de Mitigação/ Manutenção preventiva
N.º Ordem	Designação	Ref.ª						
323	Módulo de saída analógica de 2 canais -5 a +5V	FP-AO-V5B	- Definir a posição da válvula de controlo proporcional, VC	Falha na comunicação entre o FP-AO-V5B e a válvula VC	Envio de informação incorrecta, acerca da posição da válvula VC	B_F	4_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
					Nível de líquido no ebulidor não conforme com o imposto		4_F	
					Nível de líquido no ebulidor excessivo		4_F	
					Nível de líquido no ebulidor insuficiente		4_F	
324	Módulo de saída analógica de 2 canais 4-20mA	FP-AO-C420	- Definir a posição da válvula, VG	Falha na comunicação entre o FP-AO-C420 e a válvula VG	Envio de informação incorrecta, acerca da posição da válvula VG	B_F	2_F	Verificação e teste do circuito eléctrico após a montagem e semestralmente
					Caudal de refrigeração não conforme com o imposto		2_F	
					Caudal de refrigeração excessivo		1_F	
					Caudal de refrigeração insuficiente		2_F	
326	Válvula de globo	VG	-Regulação do caudal de refrigeração	Falta de corrente	Alteração do caudal de refrigeração	B_F	2_F	Instalação de uma UPS
				Sobrecarga de corrente	Alteração do caudal de refrigeração	B_F	2_F	Instalação de uma UPS
				Danificação do circuito eléctrico da válvula	Alteração do caudal de refrigeração	B_F	2_F	Testar o circuito eléctrico semestralmente
				Deterioração do corpo da válvula	Alteração do caudal de refrigeração	B_F	2_F	Inspecção visual, semestral

Nos quadros e figuras seguintes apresenta-se o resumo da análise FMEA à coluna de destilação do Laboratório de Tecnologia Química do ISEL.

Quadro 4.13 – Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência

Probabilidade de Ocorrência	Classe		Modos de Falha	
Impossível	A	M	0	0,6%
		F	4	
		Mn	0	
Muito Improvável	B	M	73	88,4%
		F	466	
		Mn	103	
Improvável	C	M	29	5,2%
		F	9	
		Mn	0	
Possível	D	M	21	5,8%
		F	21	
		Mn	0	

O quadro anterior mostra que 88,4% dos modos de falha do equipamento em estudo, que poderão ocorrer, possuem uma probabilidade de ocorrência "Muito Improvável", 5,8% possivelmente irão ocorrer, 5,2% são improváveis de ocorrer e apenas 0,6% dos modos de falha são impossíveis de ocorrer.

No quadro 4.14 e na figura 4.22 apresenta-se a probabilidade de ocorrência de falha nos diversos subsistemas que constituem o equipamento.

Quadro 4.14 – Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência e subsistema

Probabilidade de Ocorrência / **Subsistema**	**Impossível**	**Muito Improvável**	**Improvável**	**Possível**
	A	**B**	**C**	**D**
Ebulição	2	214	17	21
Esgotamento	0	50	3	2
Alimentação	0	59	6	6
Rectificação	0	47	2	2
Condensação	2	54	3	11
Estrutura	0	167	7	0
UAC	0	51	0	0

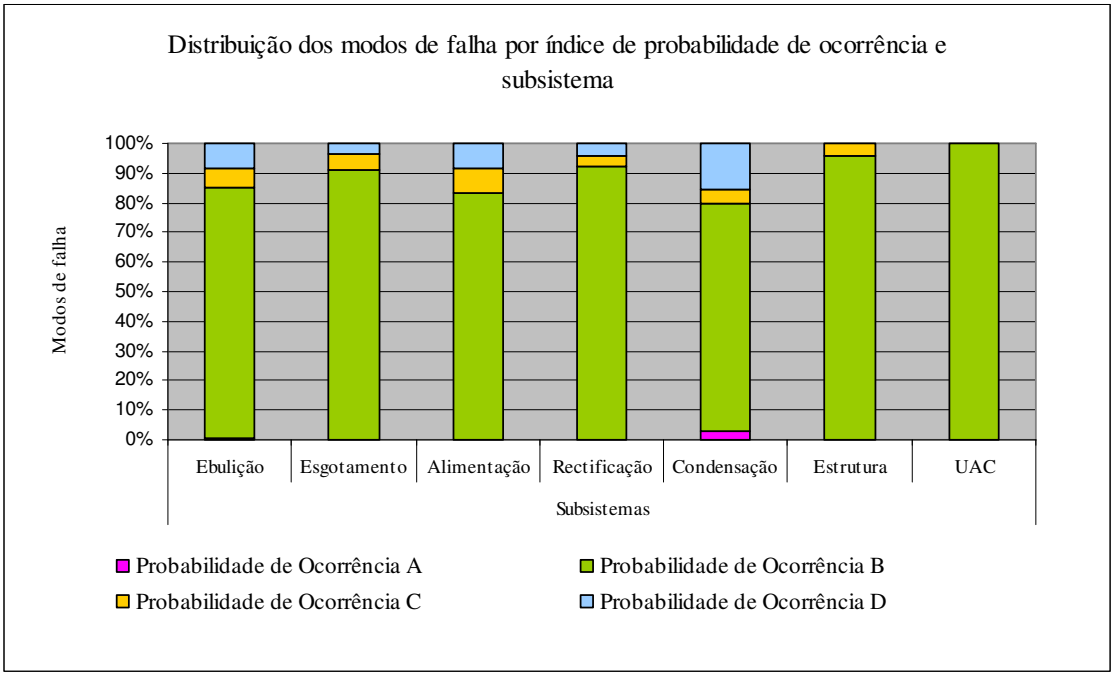


Figura 4.22– Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência e subsistema

Verifica-se que os subsistemas Ebulição e Estrutura possuem a maioria dos modos de falha do equipamento, cerca de 59% do total dos modos de falha identificados que poderão vir a ocorrer, em que 35% dos modos de falha foram identificados no subsistema ebulição e 24% no subsistema estrutura.

Relativamente ao grau de severidade pode considerar-se que este se encontra dividido em 3 classes, visto que apenas 0,4% dos efeitos dos modos de falha possuem um grau de severidade 1 (Sem Influência). Assim, 43% dos efeitos dos modos de falha possuem uma severidade "Muito Crítico", 34,3% "Crítico" e 22,3% são "Pouco Crítico", conforme consta no quadro 4.15.

Quadro 4.15 – Distribuição dos efeitos dos modos de falha por grau de severidade

Grau de Severidade	Classe	Efeito do Modo de Falha	
Sem Influência	1	4	0,4%
Pouco Crítico	2	210	22,3%
Crítico	3	323	34,3%
Muito Crítico	4	405	43,0%

Analisando o grau de severidade das falhas que poderão ocorrer em cada subsistema, verificou-se que no subsistema estrutura e no subsistema unidade de aquisição e controlo o grau

de severidade predominante é o mais severo, com 98,2% e 66,7% respectivamente. No entanto, nestes subsistemas a probabilidade de ocorrência de falhas é maioritariamente "Muito Improvável" o que significa que apesar do grau de severidade ser elevado o número de modos de falha críticos não é proporcional ao grau de severidade.

Quadro 4.16 – Distribuição dos efeitos dos modos de falha por grau de severidade e subsistema

Grau de Severidade / Subsistemas	Sem Influência	Pouco Crítico	Crítico	Muito Crítico
	1	2	3	4
Ebulição	2	81	142	83
Esgotamento	0	28	43	2
Alimentação	1	20	51	18
Rectificação	0	21	40	2
Condensação	0	47	29	24
Estrutura	0	0	4	220
UAC	1	13	14	56

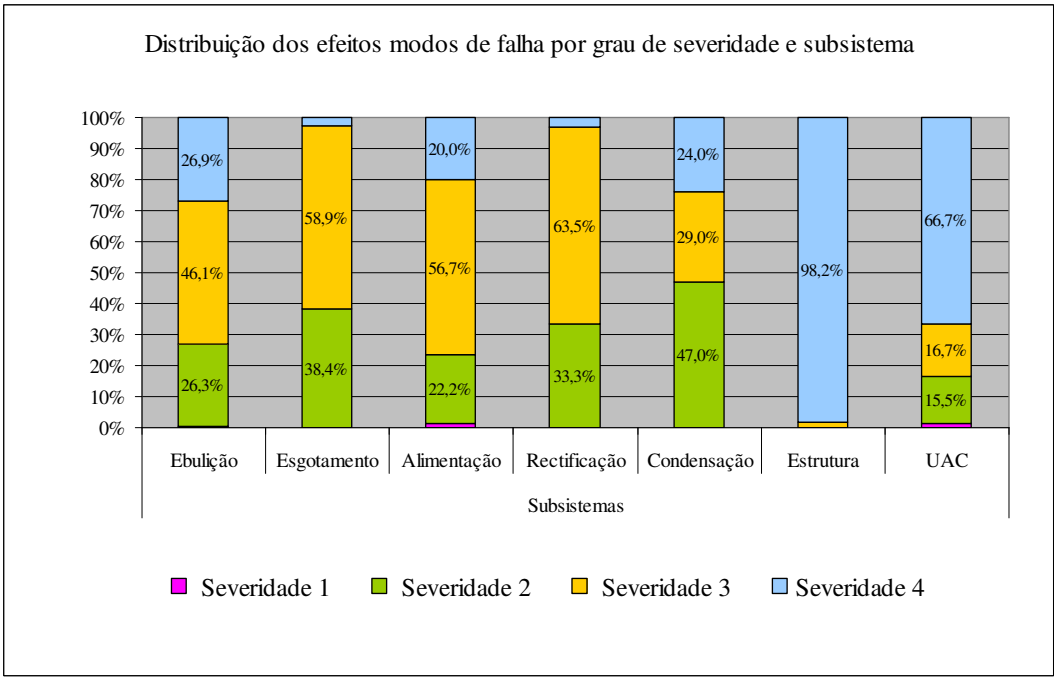


Figura 4.23 – Distribuição dos modos de falha por grau de severidade e subsistema

Nos quadro e figura abaixo encontram-se representados os modos de falha críticos nos respectivos subsistemas.

Quadro 4.17 – Distribuição dos modos de falha críticos por subsistema

Subsistemas	Modos de falha Críticos		Modos de falha não críticos	
Ebulição	43	4,6%	265	28,1%
Esgotamento	0	0%	73	7,7%
Alimentação	10	1,1%	80	8,5%
Rectificação	0	0%	63	6,7%
Condensação	23	2,4%	77	8,2%
Estrutura	14	1,5%	210	22,3%
UAC	42	4,5%	42	4,5%
Total	**132**	**14,0%**	**810**	**86,0%**

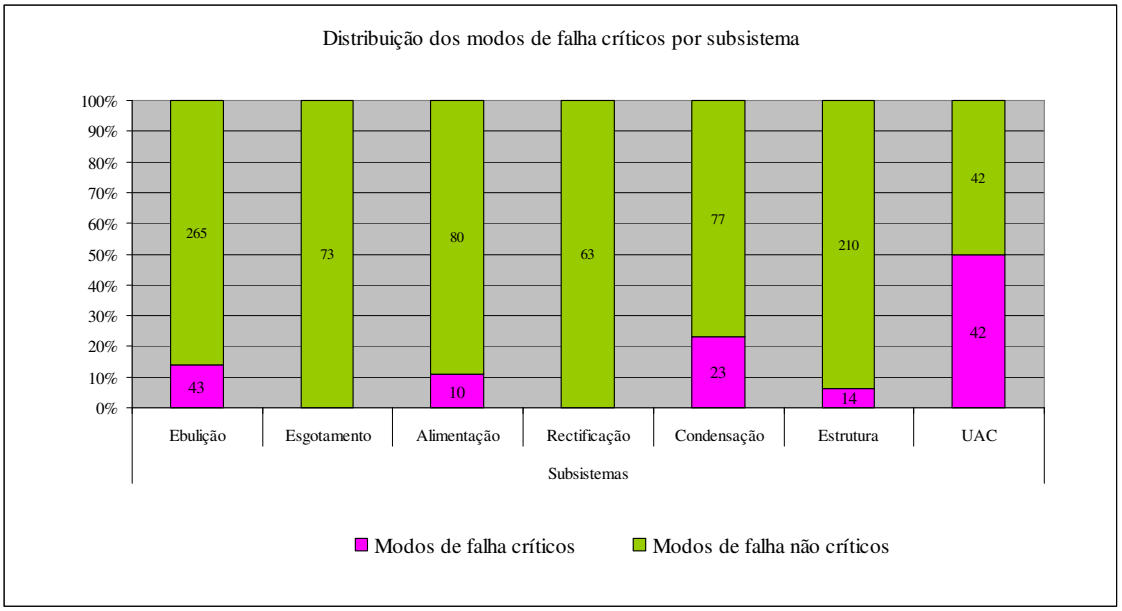


Figura 4.24 – Distribuição dos modos de falha críticos por subsistema

Verifica-se que no equipamento existem 14% de modos de falha críticos e que destes 4,6% localizam-se no subsistema ebulição e 4,5% no subsistema unidade de aquisição e controlo.

No capítulo 4 o equipamento em estudo foi dividido em 7 unidades funcionais (subsistema ebulição, subsistema esgotamento, subsistem alimentação, subsistema rectificação, subsistema condensação, estrutura e unidade de aquisição e controlo), e foi descrito em pormenor cada

uma destas unidades. No ponto 4.5 foi desenvolvida a análise FMEA de cada componente (Anexo 1 – Suporte digital "CD") e destacou-se neste documento apenas os modos de falha críticos que representam 14% do total dos modos de falha do equipamento.

CAPÍTULO 5

Conclusões

PÁGINA EM BRANCO

Com este trabalho pretendeu-se estudar o equipamento "Coluna de Destilação em Contínuo" do Laboratório de Tecnologia Química do ISEL, do ponto de vista da análise de falhas e seus efeitos. Para isso, foi desenvolvido um estudo dos princípios que servem de base ao processo químico que tem lugar neste equipamento (Destilação).

Posteriormente o equipamento foi descrito e caracterizado (Anexo 1 – Base de dados) componente a componente de acordo com a sua função, localização, descrição, fornecedor, representante, principal modo de falha, efeitos do modo de falha, probabilidade de ocorrência da falha, severidade do efeito do modo de falha e medidas de mitigação da falha e manutenção preventiva.

A análise FMEA encontra-se documentada no anexo 2. Desta análise, verificou-se a existência de um total de 726 modos de falha que originaram 942 efeitos dos modos de falha.

A probabilidade de ocorrência dos modos de falha identificados foi classificada em 4 níveis Impossível, Muito Improvável, Improvável e Possível. A distribuição dos modos de falha deste trabalho foi a seguinte:

Quadro 5.1 – Distribuição dos modos de falha por índice de probabilidade de ocorrência

Probabilidade de Ocorrência	Classe	Percentagem de modos de falha identificados
Impossível	A	0,6%
Muito Improvável	B	88,4%
Improvável	C	5,2%
Possível	D	5,8%

Os graus de severidade dos efeitos dos modos de falha identificados foram classificados em 4 níveis nomeadamente Sem Influência, Pouco Crítico, Crítico e Muito Crítico. Os resultados obtidos são os apresentados no quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Distribuição dos efeitos dos modos de falha por grau de severidade

Grau de Severidade	Classe	Percentagem dos efeitos dos modos de falha identificados
Sem Influência	1	0,4%
Pouco Crítico	2	22,3%
Crítico	3	34,3%
Muito Crítico	4	43,0%

Dos modos de falha identificados apenas 14% foram considerados críticos, e apenas dois subsistemas não apresentam modos de falha críticos, nomeadamente o subsistema esgotamento e o subsistema rectificação.

A distribuição dos modos de falha críticos foi a seguinte:

Quadro 5. 3 – Distribuição dos modos de falha crítico por subsistema

Subsistema	**Modos de falha Críticos**	
Ebulição	43	4,6%
Esgotamento	0	0%
Alimentação	10	1,1%
Rectificação	0	0%
Condensação	23	2,4%
Estrutura	14	1,5%
UAC	42	4,5%
Total	**132**	**14,0%**

A análise do quadro 5.1, indica que 88,4% dos modos de falha identificados possuem uma probabilidade de ocorrência "Muito Improvável", e o quadro 5.3 quantifica em 14% o número de modos de falha críticos. Fazendo uma análise às medidas de mitigação/manutenção preventiva propostas nos modos de falha críticos concluí-se que 40% refere-se à instalação de uma UPS, 20% à verificação e teste do circuito eléctrico, 27% inspecção visual, 1% calibração de termopar e 8% outras acções de mitigação/manutenção. Considerando estas acções de mitigação/manutenção, constata-se que não existem acções de manutenção preventiva devido a desgaste por utilização, existindo sim falhas inesperadas e com probabilidade de ocorrência "Muito Improvável" pelo que se propõe uma estratégia de manutenção correctiva. No entanto, só uma monitorização das falhas ocorridas ao longo do tempo é que permitirá clarificar se esta opção de estratégia de manutenção será a mais adequada.

Como continuação deste trabalho, será interessante a monitorização das falhas ocorridas nesta instalação e a optimização da base de dados desenvolvida, de forma a facilitar a introdução de registos de falhas ou acções de manutenção correctivas ou preventivas, de forma a validar futuramente a análise de sensibilidade que serviu de base para a atribuição dos modos de falhas e seus efeitos a cada componente, assim como os índices de probabilidade de ocorrência e severidade atribuídos a cada modo de falha.

BIBLIOGRAFIA

PÁGINA EM BRANCO

Adair-Heeley, C. (1989). The JIT challenge for maintenance, Production and Inventory Management Review with APICS News, 9(9), pp. 34-35

Aven, T., Dekker, R. (1997). A useful framework for optimal replacement models. Reliability Engineering and System Safety 58, pp. 61-67

Bateman, J. (1995). Preventive maintenance: Stand alone manufacturing compared with cellular manufacturing. Industrial Management, 37(1), pp. 19-21

Ben-Daya, M., Raouf, A. (1993). A revised failure mode and effects analysis model. International Journal of Quality Reliability Management, Vol.13 N.º1, pp. 43-7

Bevilacqua, M., Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. Reliabibility Engineering and System Safety, 70, pp. 71-83

Bevilacqua, M., Braglia, M., Gabrbrielli, R (2000). Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. Quality and Reliabibility Engineering International, 16, pp. 313-324

Can, U, Jimoh, M., Steinbach, J., Wozny, G.. (2002). Simulation and experimental analysis of operational failures in a distillation column. Separation and Purification Technology, 29, pp. 163-170

Chang, M., Chang, R., Shu, C., Lin, K. (2005). Application of risk based inspection in refinery and processing piping. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, pp. 397-402

Ching-Liang, Ping-Hung Liu, Chiu-Chi Wei (2001). Failure Mode and Effects analysis using grey theory, Integrated Manufacturing System 12,3, pp. 211, ABI/INFORM Global

Cotnareanu, Teodor. (1999). Old Tools – New uses: Equipment FMEA. Quality Progress, 32, pp.48-52

Coulson, J. M., Richardson, J. F. Chemical Engineering, vol. 2- 4th ed. - Oxford : Butterworth Heinemann, 1991

Coutinho, J.S. (1963-1964). Failure Effect Analysis, Trans. NY Acad. Sci., 26, Series II, pp. 564-584

Cowan, R., Winer, W. Modern Tribology Handbook – Vol.1, Cap.42, CRCPress, 2001

Cowan, R., Winer, W.. Modern Tribology Handbook – Technologies for Machinery Diagnosis and Prognosis. CRC Press 2001

Cuignet, Renaud. Gestão da manutenção. Lidel (2006)

Dale, B., Shaw, P. (1990). Failure mode and effects analysis in the UK motor industry: a state-of-the-art study. Quality and Reliability Engineering International, Vol.6, pp. 179-88

Deerberg, G., Schlüter, S., Steiff, A., Witt,W..(1996). Simulation of operational failures in two-phases semibatch processes. Chemical Engineering Science, 51(11), pp. 3113-3118

Dhillon, B.S.. Design Reliability-Fundamentals and applications", Department of Mechanical Engineering, CRC PRESS 1999

Dhillon, B.S.. Engineering Maintenance, CRC PRESS 2002

Doherty, M.F., Malone, M.F.. Conceptual design of distillation systems. McGraw-Hill

Feigenbaum, A. V. (1991). Total Quality Control. 3rd edition revised. McGraw-Hill, New York

Ferreira, Luís Andrade. Uma introdução à manutenção. Publindústria (1998)

Ford Motor Company, Instruction Manual Process FMEA, Ford, Dagenham, 1988, 1995

Gallimore, K., Penlesky, R. (1988). A framework for developing maintenance strategies. Production, Inventory Management Journal, 29 (1), pp. 16-22

Gans, M., Kiorpes, S.A., Fitzgerald, F.A.(1983). Plant Start up – Step by Step. Chem.Eng. Oct.3, 1983, p.74

Gilchrist, W. (1991). Modelling failure modes and effects analysis. International Journal of Quality and Reliability Management, 10(5), pp. 16-23

Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 10 N.º5, pp. 16-23

Gits, C..(1992). Design of maintenance concepts. International Journal of Production Economics, 24(3), pp. 217-226

Goto, F. Maintenance prevention, in: S. Nakajima (Ed.), Total Productive Maintenance Development Program: Implementing Total Productive Maintenance, Productivity Press, Cambridge, MA, 1989

Harrison, M.E., France, J.J. (1989-b). Distillation Column Troubleshooting. Chemical Engineering, pp.121

Harrison, M.E., France, J.J. (1989-d). Distillation Column Troubleshooting. Chemical Engineering, pp.139

Harrison, M.E., France, J.J. (1989-a). Distillation Column Troubleshooting. Chemical Engineering, pp.116

Harrison, M.E., France, J.J. (1989-c). Distillation Column Troubleshooting. Chemical Engineering, pp.126

Harrison, M.E., France, J.J.(1989). Distillation Column Troubleshooting. Chemical Engineering, March 1989, p.116; April 1989, p.121; May 1989, p.126 and June 1989, p.139

Herbaty, F. Handbook of Maintenance Management Cost Effective Practices, 2nd Edition, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1990

Hunphrey, J.L., Keller, George E.. Separation process technology. McGraw-Hill (1997)

Jovanovic, A. (2003). Risk-based inspection and maintenance in power and process plants in Europe. Nuclear Engineering and Design, 226, pp. 165-182

Juran, J.M. (1989). Quality Control Handbook. McGraw-Hill. New York

Kapur, K.C., Lamberson, L.R. (1977). Reliability in engineering design, New York, Wiley

Kelly, A. Maintenance Organizations & Systems: Business-centred Maintenance, Butterworths-Heinemann, Oxford, 1997

Kelly, A. Maintenance Planning and Control, Butterworths, London, 1984

Kister, H. Z., Gill, D.R.(1992). Flooding and Pressure Drop Prediction for Structured Packings. IChemE Symp, 128, pp. Al 09-Al 23

Kister, H.Z. (1990). Distillation Operation. McGraw-Hill

Kister, H.Z..(1997). Are column malfunctions became extinct – or will they persist in the 21st century? Institution of Chemicam Engineers. Trans IChemE, 75-A, pp. 563-589

Kister, H.Z..(2003). What caused tower malfunctions in the last 50 years? Institution of Chemicam Engineers. Trans IChemE, 81-A, pp. 5-26

Kurtz, D.P., McNulty, K.J., Morgan, R.D.(1991). Stretch the capacity of high-pressure distillation columns, *Chem. Eng. Prog.* 87, pp. 43–49

Legát, V., Zaludorá, AH., Cervenka, V., Jurca, V.(1996). Contribution to optimization of preventive replacement. Reliability Engineering System Safety, 51/3, pp. 259-266

Liang, C., Liu, P., Wei, C. (2001). Failure mode and effects analysis using grey theory. Integrated Manufacturing System, 12(3), pp. 211

Lieberman, N.P. (1985). Troubleshooting Process Operations. 2d ed. Penn Well Publishing, Tulsa, OK

Lien, CH., Chun, YH. (1986). An algorithm for preventive maintenance policy. IEEE Transactions on Reliability, 35/1, pp.71-75

Macaulay, S. (1988). Amazing things can happen if you…"Keep it Clean". Production 100 (5), pp. 72-74

Maggard, B. Bailey, C., Moss, D. (1989). IEEE/CHMT'89 IEMT Symposium, pp. 13-17

McDermott, R.E., Mikulak, R.J., Beauregard, M.R.. The basics of FMEA. Productivity Press (1996)

Michelsen, O. (1998). Use of reliability technology in the process industry. Reliabibility Engineering and System Safety, 60, pp. 170/181

MIL-F-18372 (Aer), General Specification for Design, Installation, and Test of Aircraft Flight Control Systems, Bureau of Naval Weapons, Department of the Navy, Washington, D.C.

MIL-STD-1629, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis, Department of Defense, Washington, D.C., 1980

Modern Tribology Handbook, Volume One – Principles of tribology, Cap.42 – Technologies for machinery diagnosis and prognosis

Nahara, K. (1993). Total productive management in the refinery of the 21st century. Proceedings of the conference on foundation of computer aided operations, FOCAP-O, Park City, UT, pp.111-132

Nakajima, S. Total Productive Maintenance Development Program: Implementing Total Productive Maintenance. Productivity Press, Cambridge, MA, 1988

Norma Portuguesa NP EN 50126:2000, Aplicações ferroviárias – Especificação e demonstração de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança (RAMS)

Nowlan, F. S., Howard, F. Reliability-Centered Maintenance. Department of Defense, Washington, D.C. 1978. Report Number AD-A066579

Pintelon, L., Waeyenbergh, G. (1999). A Pratical approach to maintenance modelling. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Begell House Inc., New York, pp. 1109-1119

Pires, António Ramos. Inovação e desenvolvimento de novos produtos. Edições Sílabo (1999)

Pistikopoulos, E.N, Vassiliadis, C.G., Papageorgiou, LG. (2000). Process design for maintainability: an optimization approach. Computers and Chemical Engineering 24, pp. 203 – 208

Procaccia, H., Cordier, R., Muller, S. (1997). Application of Bayesian statistical decision theory for a maintenance optimization problem. Reliabibility Engineering and System Safety, 55/2, pp.143-150

Ramakumar, R.. Technology Management Handbook – Reliability and Maintainability. CRC Press 2000

Seider, Warren D., Seader, J.D. Product and process design principles – Sysnthesis, Analysis, and evaluation.2nd edition John Wiley and Sons

Sloley, A.W., Golden, S.W., and Martin, G.R.(1995). Why towers do not work. AIChE Spring National Meeting, Houston

Stamatis, Failure Mode and Effect Analysis – FMEA from theory to execution, ASQ, 1995

Swanson, L. (2001). Linking maintenance strategies to performance. International Journal of production economics, 70, pp. 237-244

Swanson, L. (2003). A information-processing model of maintenance management. International Journal of production economics, 83, pp. 45-64

Tan, J., Kramer, M. (1997). A general framework for preventive maintenance in chemical process operations. Computers and Chemical Engineering, 21(12), pp.1451-1469

Teng, S., Ho, S. (1996). Failure mode and effects analysis – An integrated approach for product design and process control. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol.13 Nº 5, pp.8-26

Teresko, J.(1992) Time bomb or profit center? Industry Week, 241(5), pp. 52-57

Triantaphyllou, E., Kovalerchuk, B., Mann, L., Knapp, GM. (1997). Determining the most important criteria in maintenance decision making. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 3(1), pp.16-28

Tsai, Y., Wang, K., Teng, H. (2001). Optimizing prevention maintenance for mechanical components using genetic algorithms. Reliability Engineering and System Safety, 74, pp. 89-97

Tsai, Y., Wang, K., Tsai, L. (2004). A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. Reliability Engineering and System Safety, 84, pp.261-270

VanRijn, C.F.H. (1987). A system engineering approach to reliability, availability and maintenance. Proceedings of the conference on foundation of computer aided operations, FOCAP-O, Park City, UT, pp.221-252

Vanzile, D.K., Otis, I.. Measuring and controlling machine performance. Handbook of Industrial Engineering. Wiley, New York, 1992, pp. 1575-1584

Vassiliadis, C.G., Pistikopoulos, E.N. (2001). Maintenance Scheduling and process optimization under uncertainty. Computers and Chemical Engineering 25, pp. 217 – 236

Vaurio, JK. (1997). On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies. Reliabibility Engineering and System Safety, 56/1, pp.79-90

Waeyenbergh, G., Pintelon, L. (2002). A Framework for maintenance concept development. International Journal of Production Economics 77, pp. 299-313

Wallsgrove, C. S., Butler J. C. Process Plant Start-up. Continuing Education Seminar, The Center for professional Advancement, East Brunswick, N.J.

Wang, KS., Tsai, YT., Lin, CH. (1997). A study of replacement policy for components in a mechanical system. Reliabibility Engineering and System Safety, 56, pp.191-199

Zhao, Y., Ming L. Lu, Yi Yua (2000). Operation and maintenance integration to improve safety. Computers and Chemical Engineering, 24, pp. 401-407

Zheng, X. (1995). All opportunity-triggered replacement policy for multiple-unit system. IEEE Transactions on reliability, 44/4, pp. 648-652