



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**

## **Avaliação de Fiabilidade de Sistemas Elétricos e de Automação em Instalações de Frio Industrial**

**MACÁRIO MANUEL ALMEIDA SILVA**  
(Licenciatura)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica-ramo de Energia/Automação e Eletrónica Industrial

Orientador(es):

Doutor João Carlos Pires da Palma  
Doutor Fernando M. D. Oliveira Nunes

Júri:

Presidente: Professor José Manuel Igreja  
Vogais: Professor Doutor Fernando Manuel Oliveira Nunes  
Professor Armando José Leitão Cordeiro

Agosto de 2014







## **Dedicatória**

Este trabalho é inteiramente dedicado a minha família. Á minha esposa que tudo têm suportado e apoiado. A minha mãe e sobretudo ao meu Pai que faleceu no decorrer deste trabalho. A ele que sempre me apoiou e sempre acreditou em mim dedico este trabalho;

## **Agradecimentos**

Quero sobretudo agradecer a minha família que sempre me apoiou e acreditou;

## Resumo

O estudo da fiabilidade de sistemas ou elementos teve início há algumas décadas e desde aí tem vindo a desenvolver-se assumindo cada vez mais importância no funcionamento desses mesmos sistemas ou elementos. Hoje em dia cada vez mais existe a preocupação financeira relativamente a determinado sistema em termos de fiabilidade ou até mesmo em sistemas de segurança a preocupação com a probabilidade de falha a chamada.

É através do estudo da fiabilidade que se permite a alguém identificar um sistema como sendo mais seguro que um outro e assim garantir por exemplo um maior retorno financeiro as entidades que apostem neste sistema. É graças a este estudo que também se pode por exemplo garantir, estatisticamente, que um sistema de combate a incêndio irá funcionar quando for necessário. Isto permite-nos por exemplo num projeto do tipo civil, elétrico ou mecânico, etc. onde exista esta preocupação de estudo de fiabilidade, garantir alta fiabilidade do mesmo, aperfeiçoar o mesmo cometendo menos erros e evitando futuras obras de melhoramento ou eficiência energética. Óbvio que estes estudos também terão um impacto enorme no planeamento de manutenções pois é possível determinar com uma margem de erro mais reduzida a altura das avarias mais importantes e atuar antes evitando paragens e gastos maiores em equipamentos que poderiam ser evitados.

Em refrigeração industrial não é diferente. Aliás a fiabilidade assume um papel importante pois é graças a ela que se permite a maximização do lucro, ao garantir a fiabilidade de uma instalação frigorífica, proporcionamos um melhor funcionamento da instalação e menos paragens por avaria.

O objetivo do presente trabalho, é o estudo de fiabilidade de uma instalação frigorífica (apenas a automação) e a criação de uma ferramenta de trabalho que auxilie o cálculo da fiabilidade deste sistema em particular ou um outro qualquer noutra área.

Para este estudo foi criada uma ferramenta em Excel que permite o cálculo de fiabilidade em sistemas independentemente do seu tipo. Esta ferramenta é baseada no cálculo de fiabilidade de sistema por diagramas de blocos

A ferramenta pretende apenas auxiliar o cálculo de fiabilidade do sistema em estudo continuando a ser importante ter conhecimentos prévios de fiabilidade por parte de quem analisa o sistema.

A ferramenta foi desenvolvida em Excel (programação em VBA) no sentido de avaliar a sua aceitação no mercado. Caso exista uma grande aceitação, a mesma deverá ser desenvolvida em uma aplicação para o efeito.

Com a ferramenta será possível ao projetista antecipadamente resolver problemas de funcionamento da instalação tal como criar protocolos a ser aplicados na manutenção preventiva de modo a aumentar os intervalos de tempo entre avarias.

Será possível introduzir um novo conceito em projetos. Será possível classificar um projeto em termos de fiabilidade e até mesmo prever quando deverá ocorrer a primeira avaria grave do sistema.

**Palavras-Chave**

RAMS, Fiabilidade em sistemas de refrigeração, Ferramenta de cálculo em fiabilidade, Fiabilidade em automação.

## Abstract

The study of the reliability of systems or elements began decades ago and since then has been increasingly developed assuming importance in the functioning of these systems or elements. Today there is an increasingly financial concern for a given system in terms of reliability or even security systems concerning the probability of failure on call.

It is through the study of reliability that allows someone to identify a system as being safer than another and thus ensure for example a greater financial return to the entities who bet this system. Thanks to this study that can also ensure for example, statistically, a fire fighting system will work when needed. This allows us for example in a civil, electrical, mechanical project, etc. where this concern of reliability study exists, ensure high reliability even improving it committing fewer errors and avoiding future renovating or energy efficiency. Obvious that these studies will also have a huge impact on the planning of maintenance it is possible to determine with a smaller margin of error at the time of the most important act before avoiding breakdowns and stoppages and higher spending on equipment that could be avoided.

In industrial refrigeration is no different. In addition reliability plays an important role because it is thanks to her that allows the maximization of profit, to ensure the reliability of a refrigeration plant, provide a better operation of the facility and fewer stops by damage.

The goal of this work is the study of reliability of a refrigeration installation (just automation) and the creation of a working tool that helps calculate the reliability of this particular system or any other area.

For this work a tool in Excel that allows calculating reliability in systems regardless of their type was created. This tool is based on a reliability calculation system block diagrams.

The tool is intended to only help the calculation of reliability of the system under study continuing to be important to have prior knowledge of reliability on the part of those who analyze the system.

The tool was developed in Excel (VBA programming) in order to assess their market acceptance. If there is a large acceptance, it must be developed in an autonomous application for that purpose.

With the tool you can advance the designer troubleshoot operation of the facility as create protocols to be applied in preventive maintenance in order to increase the time intervals between failures.

It will be possible to introduce a new concept in projects, making possible to classify a project in terms of reliability and even predict when the first serious system failure should occur.

**Keywords**

RAMS, reliability in refrigeration systems, Calculation Tool in reliability, Reliability in automation.

**Índice**

1.	Introdução .....	17
1.1.	Resenha histórica da Fiabilidade .....	18
2.	Estado da Arte dos Sistemas de Refrigeração .....	20
2.1.	Sistemas de Refrigeração .....	20
2.2.	Refrigeração Industrial .....	21
2.3.	Depósito e armazenamento de produtos alimentares refrigerados .....	21
2.4.	Produtos alimentares Congelados .....	22
2.5.	Ciclo de refrigeração .....	23
2.5.1.	Ciclo de refrigeração padrão por compressão .....	24
2.5.2.	Fluidos Frigorígenos .....	26
3.	Estudo teórico de suporte à Ferramenta de Cálculo .....	31
4.	Apresentação do Caso Prático a estudar .....	39
5.	Descrição do Sistema e Processamento de dados para o Estudo .....	49
6.	Aplicação da Ferramenta de Cálculo .....	60
7.	Resultados e Conclusões .....	77
8.	Referências .....	78
9.	Anexos .....	81
9.1.	Programação em VBA .....	81
9.1.1.	Programa principal .....	81
9.1.2.	Inicializar variáveis .....	83
9.1.3.	Ultima linha ocupada .....	84
9.1.4.	Guardar como .....	85
9.1.5.	Validar elementos .....	87
9.1.6.	Leitura de valores .....	88
9.1.7.	Elemento inicial e secundário .....	93
9.1.8.	Elementos em paralelo .....	94
9.1.9.	Entrada de dados .....	96
9.1.10.	Cálculos .....	98
9.1.11.	Apresentar resultados .....	115
9.1.12.	Limpar a folha .....	116

**Lista de Figuras**

Figura 1 - Esquema básico de um sistema de refrigeração.....	24
Figura 2 - Curva da Banheira .....	31
Figura 3 - Curva da banheira mais detalhada.....	32
Figura 4 - Sistema composto .....	38
Figura 5 - Central de compressores – Circuito frigorífico nº 1.....	40
Figura 6 - Compressor frigorífico do circuito nº 1.....	41
Figura 7 - Condensador Evaporativo .....	42
Figura 8 - Circuito frigorífico nº 2.....	43
Figura 9 - Evaporador da Câmara de Congelados .....	44
Figura 10 - Evaporador do Cais .....	45
Figura 11 - Quadro elétrico da instalação .....	46
Figura 12 - Diagrama da instalação .....	49
Figura 13 - Diagrama do circuito frigorífico nº 1.....	49
Figura 14- Diagrama do circuito frigorífico nº 2.....	49
Figura 15 – Fluxograma do circuito de automação.....	50
Figura 16 - Diagrama de circuito de comando .....	54
Figura 17 - Diagrama do sistema simplificado .....	55
Figura 18 - Diagrama de UPS//Bypass.....	56
Figura 19 - Diagrama do circuito de comando simplificado.....	57
Figura 20 - Diagrama de circuito de comando simplificado.....	58
Figura 21 - Diagrama do circuito de comando simplificado.....	58
Figura 22 - Diagrama do circuito de comando simplificado com duas fontes de alimentação em paralelo .....	59
Figura 23 - Página inicial da ferramenta .....	60
Figura 24 - Sistema criado na ferramenta.....	60
Figura 25 - Cálculo de sistema Ups//Bypass na Ferramenta.....	61
Figura 26 - Cálculo da fiabilidade de um relé na ferramenta.....	62
Figura 27 - Resultados do cálculo da fiabilidade de um relé.....	63
Figura 28 - Cálculo de sistema Ups//Bypass na Ferramenta.....	64
Figura 29 - Entrada de dados (manualmente ou base de dados) .....	64
Figura 30 - Entrada de dados .....	65
Figura 31 - Entrada de dados do 1º elemento .....	65
Figura 32 - Notificação para a entrada de dados do 1º elemento.....	66
Figura 33 - Introdução de dados manualmente.....	66
Figura 34 - Entrada de dados do último elemento .....	67
Figura 35- Notificação para a entrada de dados do último elemento.....	67
Figura 36 - Entrada de dados manualmente.....	67
Figura 37 - Entrada de dados do 2º elemento .....	68
Figura 38 -Notificação de entrada de dados do 2º elemento.....	68
Figura 39 - Entrada de dados manualmente do 2º elemento.....	68
Figura 40 - Entrada de dados do 3º elemento .....	69
Figura 41 - Entrada de dados do 3º elemento .....	69
Figura 42 - Entrada de dados manualmente do 3º elemento.....	69
Figura 43 - Fiabilidade do sistema UPS//Bypass .....	70
Figura 44 - Sistema em estudo.....	71
Figura 45 - Resultados do cálculo do sistema estudado .....	71

Figura 46 - Aumento de fiabilidade do sistema com a incursão de uma segunda fonte de alimentação.....	72
Figura 47 - Resultado final.....	72
Figura 48 - Acesso á base de dados.....	74
Figura 49 - Base de dados .....	74
Figura 50 - Escolha do equipamento pretendido.....	75
Figura 51 - Lista dos vários equipamentos da base de dados.....	75
Figura 52 - Sistema estudado .....	76
Figura 53 - Sistema estudado com a introdução de uma segunda fonte de alimentação.....	76

**Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Valores de taxa de falhas de alguns equipamentos. .... 51

## Lista de Abreviaturas

COP	Coeficiente de Performance
CFC	clorofluorocarboneto
ppm	Partes por milhão
R(t)	(Reliability) Fiabilidade
MTTF	(Mean Time To Fail) Tempo médio até a falha;
MTBF	(Mean Time Between Failures) Tempo médio entre falhas no caso de existir reparação;
MTTR	(Mean Time To Repair) Tempo médio de reparação;
MDT	(Mean Down Time) Tempo médio de paragem;
PDF	(Probability of Failure on Demand) Probabilidade de falha à chamada
SFF	(Safe failure fraction) Fração de falhas seguras
MTTFD	(Mean time to fail dangerously) Tempo médio até à falha reigosa
MTTFS	(Mean Time to Fail Spuriously) Tempo médio até à falha espúria
PFS	Probabilidade de falsa falha

**Lista de Símbolos**

$\lambda$	Taxa de falhas total ( $h^{-1}$ )
$\lambda_D$	Taxa de falhas detetáveis ( $h^{-1}$ )
$\lambda_U$	Taxa de falhas não detetáveis ( $h^{-1}$ )
$C_D$	Cobertura do diagnóstico de falhas detetáveis
$C_U$	Cobertura do diagnóstico de falhas não detetáveis
$T_r$	Tempo médio de reparação ( $h$ )
$T$	Intervalo entre manutenções ( $h$ )
$\lambda_{SD}$	Taxa de falhas seguras detetáveis
$\lambda_{SU}$	Taxa de falhas seguras indetetáveis
$\lambda_{DD}$	Taxa de falhas perigosas detetáveis
$\lambda_{DU}$	Taxa de falhas perigosas indetetáveis
$\mu$	Taxa de reparação
$A$	Disponibilidade
$U$	Indisponibilidade
$\lambda_{CCF}$	Taxa de falhas com causa comum
$\beta$	Modelo $\beta$
$\beta_D$	Fator de falhas detetáveis com causa comum
$\beta_U$	Fator de falhas não detetáveis com causa comum

## 1. Introdução

A teoria da fiabilidade nasceu da necessidade de lidar com tecnologia moderna, em particular, com os sistemas militares complexos durante a II Guerra Mundial.

Em termos teóricos a definição de fiabilidade de um sistema ou de um componente pode ser interpretada como sendo a probabilidade do sistema ou do componente desempenhar, de uma forma adequada, a função para que foi concebido, nas condições previstas e nos intervalos de tempo em que tal é exigido. **(Barbosa, 2013)**

Em termos práticos, confiabilidade ou fiabilidade é a capacidade de um sistema ou componente, realizar e manter o seu funcionamento normal em circunstâncias de rotina, bem como em circunstâncias hostis e inesperadas.

A introdução da probabilidade e estatística no mundo da engenharia é muitas vezes visto com ceticismo por aqueles que defendem a engenharia como uma ciência determinística. É porem óbvio que as probabilidades e a estatística constituem uma ferramenta importante na análise de problemas no mundo da engenharia.

O critério de "funções adequadas" é um problema do mundo da engenharia. Envolve uma detalhada investigação dos modos de avaria e falha de cada componente e do sistema. Uma avaria do sistema não é apenas uma perda de continuidade ou uma catástrofe. No caso de um Sistema Elétrico de Energia, o conceito de avaria não se resume apenas a falta de tensão na alimentação, mas compreende, por exemplo, a situação em que a tensão está fora dos limites contratuais. Se a frequência não se mantiver dentro dos valores devidos, também estamos na presença de uma "avaría" do sistema.

A análise de fiabilidade será então um método de quantificar o que se espera que aconteça e pode ser usada para indicar méritos relativos de esquemas alternativos de sistemas, tendo em atenção um nível de fiabilidade predefinido.

Em suma a fiabilidade será a probabilidade de um equipamento funcionar satisfatoriamente (isto é, cumprindo a função requerida) durante um certo intervalo de tempo e sob condições especificadas. Fiabilidade, é assim a probabilidade de operação sem falha.

## 1.1. Resenha histórica da Fiabilidade

A fiabilidade é um conceito que tem vindo a ser usado ao longo dos anos como sendo um atributo recomendável para uma pessoa ou um produto.

A palavra nasceu modestamente em 1816 e foi proferida pela primeira vez, pelo poeta Samuel Taylor Coleridge. Em estatística, fiabilidade é a consistência de um conjunto de medições ou instrumentos de medição, usados normalmente para efetuar um ensaio. A fiabilidade está inversamente relacionada com o erro aleatório. Na Psicologia, a fiabilidade refere-se á consistência de uma medição. Um teste é considerado fiável se obtivermos o mesmo resultado, repetidamente. Embora isto seja tudo verdade após a II Guerra Mundial a palavra fiabilidade começou a simbolizar também **dependabilidade** ou **repetibilidade**. O seu uso mais moderno foi redefinido pelos militares dos Estados Unidos nos anos 40 e evoluiu até ao presente.

Inicialmente começou por simbolizar apenas que um dado produto iria realizar a sua função quando o mesmo fosse solicitado.

O significado atual felizmente simboliza não só que um dado produto irá realizar a sua função quando o mesmo for solicitado, mas também uma série de outros atributos que se expandiram a outras áreas tais como produtos, serviços, software ou atividades humanas.

Nos anos 20, a melhoria de produtos através do controlo de qualidade estatístico foi promovido pelo Dr. Walter A. Shewart nos laboratórios Bell.

Num caminho paralelo à fiabilidade de produtos estava o desenvolvimento da ciência da estatística. A estatística como ferramenta para a realização de medições viria a tornar-se inseparável no desenvolvimento dos conceitos de fiabilidade.

Nesta altura, os projetistas ainda eram os responsáveis pela fiabilidade e os técnicos eram quem tratavam das falhas. Não havia planos proactivos de prevenção ou justificação económica para realizar os mesmos.

Durante os anos 20 e 30, o Eng.<sup>o</sup> Mecânico Frederick Winslow Taylor desenvolveu métodos para a construção de produtos mais consistentes e processos de fabrico mais eficientes. Foi o primeiro a separar a engenharia da gestão e controlo. O Sr. Charles Lindberg exigiu que o motor de 9 cilindros arrefecido a ar para o seu avião fosse capaz de trabalhar continuamente durante 40 horas sem manutenção. Foi nesse avião que realizou o primeiro voo solitário transatlântico sem escalas.

A qualidade e a avaliação de processos ainda estavam no seu início, mas a crescer. Wallodie Weibull estava a estudar durante este período na Suécia, a fadiga dos materiais. Ele criou uma distribuição que hoje é conhecida por distribuição de Weibull. Nos anos 30, Rosen e Rammler estavam também a investigar uma distribuição similar para descrever a finura do carvão em Pó.

Nos anos 40, fiabilidade e engenharia da fiabilidade simplesmente ainda não existiam. As exigências da 2ª Guerra Mundial vieram a introduzir muitos produtos eletrónicos novos no mundo militar. Estes produtos novos na sua maioria, nunca estavam funcionais na altura em que eram necessários. Assim o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), fundou a sociedade de fiabilidade em 1948 com Richard Rollman como seu primeiro presidente. Também em 1948, Z.W. Birn Baum fundou o laboratório de investigação estatística na Universidade de Washington.

No início dos anos 50, Wallodi Weibull publicou o seu primeiro documento, para o jornal ASME. O título do artigo era “A Statistical distribution function of wide Applicability”. Em 1959, publicou o artigo: “Statistical Evaluation of data from fatigue and Creep Rupture Tests: Fundamental concepts and general methods”.

Do lado dos militares, no ano de 1950 foi criado um grupo de estudo. Este grupo chamava-se Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment, AGREE. Em 1952 um relatório inicial deste grupo recomendava os seguintes três pontos para a criação de sistemas fiáveis:

1. Existe a necessidade de desenvolver melhores e mais consistentes componentes por parte dos fornecedores;
2. O corpo militar deverá estabelecer padrões de qualidade e fiabilidade para os fornecedores de componentes;
3. Dados reais de campo devem ser adquiridos em componentes, a fim de estabelecer as causas dos problemas;

Nos anos 60, publicaram um relatório que recomendava testes formais dos produtos com tratamento estatístico. Também eram recomendados testes mais longos e mais duros em termos ambientais que incluíam temperaturas extremas e vibrações. Estes tipos de ensaios tornaram-se muito famosos e eventualmente foram introduzidos na “Military Standard 781”. O último item a ser disponibilizado pelo relatório da AGREE foi a clássica definição de fiabilidade. O relatório afirmava que a definição de fiabilidade é a probabilidade de um produto desempenhar sem falhas uma determinada função sobre determinadas condições, durante um período específico de tempo.

Richard Nelson da RADC (Rome Air Development Center) criou o documento, “Quality and Reliability Assurance Procedures for Monolithic Microcircuits”, que eventualmente se tornou no documento Mil-Std 883 e Mil-M 38510.

Efetivamente, 1962 foi um ano chave com a primeira edição do manual militar Military Handbook 217 pela Marinha. Nesta altura já existiam as duas vertentes da fiabilidade. A primeira dedicava-se á investigação de falhas. A outra dedicava-se á predição.

Em outubro de 1968, o exército dos estados unidos lançou um manual de fiabilidade (AMCP 702-3), enquanto a McGraw-Hill lançava o livro “Probabilistic Reliability” do autor Martin Shooman para cobrir várias abordagens estatísticas.

A década de 80 foi uma década de grandes mudanças. Foi uma década de grande evolução tecnológica em diversas áreas tais como as televisões, os automóveis, sistemas de ar condicionado, controladores eletrónicos, micro-ondas, etc. Os sistemas de comunicação começaram a adotar elementos eletrónicos ao invés dos tradicionais sistemas mecânicos (**McLinn, 2010**)

## 2. Estado da Arte dos Sistemas de Refrigeração

O presente trabalho incide sobre sistemas de refrigeração industrial. As instalações de frio industrial possuem diversos subsistemas de natureza termodinâmica, eletromecânica, eletrónica e de automação. Este trabalho está focado principalmente na área da Automação e controlo das instalações de frio industrial, ou seja o cérebro da instalação.

### 2.1. Sistemas de Refrigeração

Existem essencialmente dois tipos de aplicação dos sistemas de refrigeração: ar condicionado e refrigeração industrial.

Ambos os sistemas, têm um objetivo comum, que é arrefecer alguma substância. Ambos os sistemas são constituídos pelo mesmo tipo de equipamentos: Compressores, Permutadores de placas, Ventiladores, Bombas, Tubagens e Controladores. Os fluidos predominantes são o ar, a água e os refrigerantes. O sistema de refrigeração (processo de refrigeração) é uma parte integrante de ambos os sistemas.

Embora ambas as áreas partilhem muito entre si, existem suficientes diferenças nos sistemas, tais como componentes, diagramas frigoríficos e áreas de negócio que justifiquem o tratamento em separado dos dois tipos de sistemas. Em quase todos os aspetos a dimensão da indústria do ar condicionado suplanta a indústria da refrigeração industrial, traduzindo-se no número de unidades vendidas e instaladas, vendas brutas, e número de técnicos a trabalhar.

Mesmo assim a refrigeração industrial é uma indústria com um peso importante. Esta proporciona aos seus profissionais, desafios técnicos, e presta um importante papel na indústria e na sociedade.

Correndo o perigo de isolar uma área técnica e assim perder a importância de considerar áreas relacionadas, a refrigeração industrial não pode ser vista apenas como um ramo dos sistemas de ar condicionado. A refrigeração industrial é caracterizada por ser especial e o custo relacionado em termos de engenharia e construção normalmente é mais alto do que com a indústria de ar condicionado.

Muitas situações insólitas podem acontecer em instalações de refrigeração industrial que simplesmente não surgem em sistemas de ar condicionado. A instalação de um sistema de ar condicionado geralmente é um sistema pré-fabricado, pronto a funcionar bastando para tal realizar as ligações elétricas, fornecer água e ar. Na refrigeração industrial já não é tão simples assim. É mais comum realizar instalações do tipo chave na mão devido à diversidade de aplicações.

Outra característica distintiva é o facto de as instalações de refrigeração industrial usualmente consistirem em compressores em paralelo, condensadores e evaporadores em separado consoante cálculos frigoríficos, em contraste com unidades construídas em fábrica contendo já cada um destes elementos para instalações de ar condicionado.

Quando é necessário expandir uma instalação de refrigeração industrial geralmente, adiciona-se mais um compressor, um condensador e/ou um evaporador.

Outra diferença é que nas instalações de ar condicionado, geralmente as mesmas trabalham com fluidos tais como água e ar. Nas instalações de refrigeração industrial apenas ocasionalmente se usa ar comprimido sendo que na maior parte das instalações, incorpora redes de distribuição com fluidos refrigerantes (*Stoecker, 1998*).

## 2.2. Refrigeração Industrial

Uma das principais características da refrigeração industrial, são as gamas de funcionamento da mesma, em termos de intervalo de temperaturas. Por um lado as temperaturas de evaporação podem ser muito altas, até por exemplo 15°C. Por outro lado a gama de temperaturas de funcionamento pode estender-se até temperaturas negativas de -60°C ou - 70°C.

Em temperaturas abaixo de -70°C já se utiliza outro tipo de sistema, os chamados sistemas criogénicos. Este tipo de aplicação produz e usa gás natural liquefeito, nitrogénio líquido, oxigénio líquido e outras substâncias de baixas temperaturas.

Se para descrever a refrigeração industrial fosse indicada como a refrigeração que é usada para a indústria alimentar, química, e processos industriais, então provavelmente estariam cobertos dois terços das suas aplicações.

Outra aplicação significativa existe na indústria fabril e em laboratórios, onde é necessário manter condições especiais, especialmente temperaturas baixas.

As temperaturas baixas são o melhor método de caracterizar a refrigeração industrial, mas por outro lado algumas aplicações industriais de bombagem de calor, que rejeitam calor a temperaturas muito mais altas que a temperatura ambiente, podem também ser consideradas como aplicações de refrigeração industrial (**Stoecker, 1998**).

## 2.3. Depósito e armazenamento de produtos alimentares refrigerados

A vida útil da maioria dos alimentos é reforçada pelo armazenamento a baixas temperaturas.

A vida útil de todos os produtos aumenta à medida que a temperatura de armazenamento baixa, mas para determinados produtos alimentares, tais como bananas e certos tipos de maçãs, a temperatura de armazenamento ótima é maior do que a temperatura de congelação. Para a maioria das carnes, peixes, frutas e legumes, o tempo de vida pode ser prolongado através da manutenção dos produtos a temperaturas baixas.

Muitos alimentos são armazenados no estado refrigerado e raramente são congelados.

Algumas frutas podem ser armazenadas a temperaturas ligeiramente abaixo de 0° C sem congelarem, porque a água presente no fruto está em solução com açúcares e outras substâncias que fornecem um ponto de congelação abaixo de 0 °C.

Certas carnes e produtos avícolas mantêm melhor a sua qualidade quando armazenados a temperaturas de cerca de -1 °C em vez de temperaturas em que permanecem descongelados.

Imediatamente após a colheita, os frutos ou legumes estão muitas vezes quentes (temperatura ambiente).

Enquanto os produtos arrefecem numa sala refrigerada, a taxa de tal arrefecimento pode ser muito lenta, derivado aos mesmos estarem quentes. Nestes casos muitas vezes, é aplicado um pré-arrefecimento. Este arrefecimento pode ser via ar forçado, aplicação de gelo, *hidrocooling* onde o produto é inundado com água gelada e arrefecimento a vácuo. Estes são alguns exemplos de métodos de refrigeração pós-colheita.

O pré arrefecimento a Vácuo, é um dos métodos utilizados, por exemplo, para a alface. Esta é colocada numa câmara de vácuo até que uma pequena quantidade de água sobre as folhas se evapore. O processo proporciona uma rápida refrigeração interna da cabeça da alface (**Stoecker, 1998**).

## 2.4. Produtos alimentares Congelados

A história dos produtos alimentares congelados remonta até meados do século 1800. Já em 1861, o peixe era congelado com gelo e sal e era possível armazená-lo durante 8 a 10 meses. O primeiro transporte bem-sucedido de carne congelada foi no navio francês Paraguay no ano 1878, quando a mesma foi transportada desde Buenos Aires até França. Em 1880 o navio S.S. Strathleven transportou uma carga de carne congelada desde a Austrália até Inglaterra.

Na América do Norte, durante uma expedição científica nos anos de 1912 a 1915 um dos membros da expedição, Clarence Bird, notou que o peixe congelado a temperaturas abaixo de zero mantinha a sua qualidade por longos períodos de tempo.

Cresceu assim o mercado de alimentos congelados nos EUA. O mercado de alimentos congelados cresceu de 180.000 kg em 1942 para 6.000 milhões de kg em 1995.

A era moderna para os alimentos congelados começou com a descoberta do congelamento rápido. Ao congelar o produto dentro de algumas horas (ou vários minutos, no caso de pequenas quantidades), em vez de dias, evita-se a criação de cristais de gelo microscópicos no interior do produto.

Os métodos mais populares de congelação de alimentos incluem a congelação por ventilação forçada (onde o ar a baixas temperaturas passa a alta velocidade pelos alimentos), congelação por contacto (os alimentos são colocados entre placas de refrigeração), congelação por imersão (o alimento é imerso em tanques de salmoura de baixa temperatura), *beltfreezers* que criam túneis de vento a baixa temperatura em alta velocidade por baixo do tapete transportador, *spiralfreezers* (túnel de arrefecimento rápido) em que o produto é transportado sobre um tapete transportador dentro de uma câmara a baixa temperatura e aplicado congelamento criogénico utilizando dióxido de carbono líquido ou azoto.

Na cadeia de distribuição, os alimentos congelados devem ser armazenados, pela primeira vez em grandes armazéns refrigerados, e depois em pequenas quantidades, perto do mercado.

As temperaturas de armazenamento para alimentos congelados são geralmente entre -20 °C e -23 °C, embora alguns produtos como peixe e gelados sejam geralmente armazenados a temperaturas mais baixas.

Os entrepostos de armazenamento de peixe podem chegar a manter temperaturas de -30°C (*Stoecker, 1998*).

## 2.5. Ciclo de refrigeração

Refrigeração é o processo de arrefecer um determinado ambiente de forma controlada, tanto para viabilizar processos, como para processar e conservar produtos ou efetuar a climatização de espaços para conforto térmico.

Para diminuir a temperatura, é necessário retirar energia térmica de determinado corpo ou meio. Através de um ciclo termodinâmico, o calor é extraído do ambiente a ser arrefecido e é enviado para o ambiente externo. No processo de refrigeração, o calor não é destruído, apenas é “transferido”. Na indústria alimentar o método de refrigeração é utilizado para retardar o processo de degradação dos alimentos. É nesta área onde as aplicações da refrigeração são mais complexas, pois cada alimento em fase de conservação necessita de temperaturas diferentes. Existem alimentos que necessitam de refrigeração logo no seu processo de produção como sendo os queijos, bebidas, pão, entre outros.

Entre os ciclos de refrigeração, os principais são o ciclo de refrigeração padrão por compressão, o ciclo de refrigeração por absorção e o ciclo de refrigeração por magnetismo (*Instruel, 2013*).

### 2.5.1. Ciclo de refrigeração padrão por compressão

Num ciclo de refrigeração padrão por compressão (refrigeração, ar-condicionado), existem basicamente quatro componentes:

Compressor, condensador, dispositivo de expansão (válvula expansora) e evaporador.

Para determinar as condições de trabalho do ciclo, aplica-se a primeira lei da termodinâmica (lei da conservação da energia) em cada volume de controlo.

Representa-se o ciclo no diagrama seguinte, aonde se indica pela cor o estado do refrigerante em cada etapa.

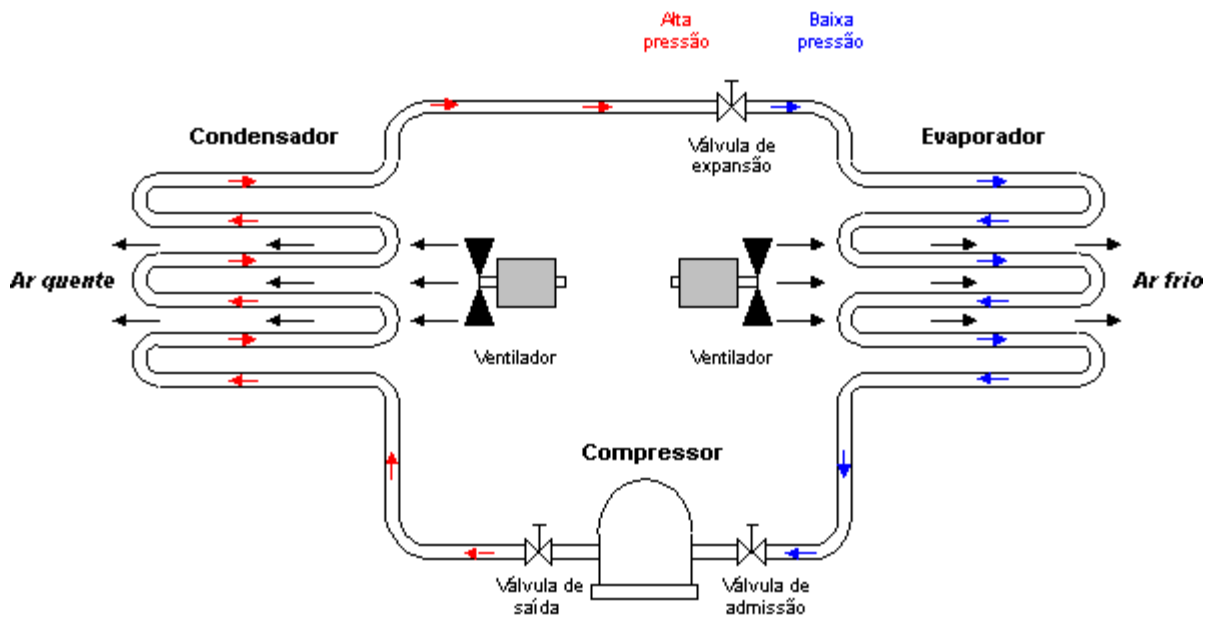


Figura 1 - Esquema básico de um sistema de refrigeração

#### Etapas de um Ciclo Ideal de Refrigeração

**Evaporação.** A evaporação é a etapa onde o fluido refrigerante entra na serpentina do evaporador como uma mistura predominantemente líquida, e absorverá calor do ar forçado pelo ventilador que passa entre os tubos da serpentina. Ao receber calor, o fluido saturado vaporiza-se, utilizando-se o calor latente para poder maximizar a troca de calor.

**Compressão.** A função do compressor é comprimir o fluido refrigerante, elevando a pressão do fluido. Num ciclo ideal, a compressão é considerada adiabática reversível, ou seja, desprezam-se as perdas. Na prática perde-se calor para o ambiente nessa etapa, porém não é significativo em relação à potência de compressão necessária.

**Condensação.** A condensação é a etapa onde ocorre a rejeição de calor do ciclo. No condensador, o fluido na forma de gás saturado é condensado ao longo do permutador de calor, que em contacto com o ar e cede calor ao meio ambiente.

**Expansão.** A expansão é a etapa onde ocorre uma perda de pressão brusca, porém controlada que vai reduzir a pressão do fluido de condensação para a pressão de evaporação. Num ciclo ideal ela é considerada isoentálpica, desprezando-se as variações de energia cinética e potencial.

**Coeficiente de performance.** O coeficiente de performance, COP, é um parâmetro fundamental na análise de sistemas de refrigeração. Mesmo sendo de um ciclo teórico, podem-se verificar os parâmetros que influenciam o desempenho do sistema. A capacidade de retirar calor sobre a potência consumida pelo compressor deve ser a maior possível. Define-se COP com a seguinte relação:  $COP=Q_i/W_c$  (*Instruel, 2013*).

## 2.5.2. Fluidos Refrigerígenos

Os processos de refrigeração variam bastante, assim como os agentes refrigerantes. Porém, os princípios básicos continuam a ser a compressão, condensação e expansão de um gás num sistema fechado. Ao se expandir, o gás retira o calor do ambiente e dos produtos que nele estiverem contidos.

Poucas substâncias têm propriedades que lhes permitam ser utilizadas como fluido refrigerígeno. Não existe um fluido refrigerígeno ideal. A escolha de um fluido é um compromisso entre diversos fatores, dos quais se destacam:

- Facilidade de fabrico
- Toxicidade
- Inflamabilidade
- Impacto ambiental
- Corrosividade
- Propriedades termodinâmicas
- Rendimento energético

Genericamente e do ponto de vista do rendimento energético, é desejável que o ponto crítico do fluido (temperatura acima da qual o fluido não se pode condensar) seja o mais elevado possível quando comparado com as temperaturas de extração e de rejeição de calor. As propriedades de transferência de calor e de transporte também são importantes para o rendimento energético pois reduzem os custos de funcionamento e permitem diferenças menores de temperaturas nos evaporadores e nos condensadores e em consequência menores saltos de temperatura. Genericamente, os fluidos com baixo peso molecular e baixa viscosidade têm as melhores aptidões (*Serrano, 2010*).

### **Características desejáveis dos refrigerantes:**

O refrigerante deve ser não inflamável, não explosivo, não tóxico em seu estado puro ou quando misturado com o ar, e também, não deve contaminar alimentos ou outros produtos armazenados no espaço refrigerado se ocorrer um vazamento no sistema.

As pressões correspondentes às temperaturas disponíveis com os meios de condensação normais não devem ser excessivas, para assim eliminar a necessidade de construção demasiado pesada.

As pressões correspondentes às temperaturas necessárias para maior parte dos processos de condicionamento de ar e refrigeração devem estar acima da pressão atmosférica para assim evitar penetração de ar e vapor d' água no circuito.

Um calor de condensação relativamente elevado é desejável para que as capacidades necessárias possam ser obtidas com menor peso do fluido refrigerante.

O vapor deve ter um volume específico relativamente baixo, porque é este volume que estabelece a dimensão necessária ao deslocamento do compressor. Esta propriedade é mais importante para o compressor alternativo do que para a máquina centrífuga a qual é uma bomba de baixa pressão e grande volume.

É desejável que o refrigerante tenha um baixo calor específico no estado líquido para que menos calor seja necessário para arrefecer o líquido partindo da temperatura de condensação até a temperatura a qual o arrefecimento deve ser realizado. O calor necessário para este arrefecimento resulta em "Flash Gas", e diminui o efeito de refrigeração ou capacidade de arrefecimento do refrigerante circulado.

Os coeficientes de transferência de calor e a viscosidade devem contribuir para boas proporções de transferência de calor.

O refrigerante deve ser facilmente detetado por indicadores adequados para localizar fugas no sistema.

O refrigerante deve ser compatível com os óleos lubrificantes usuais, e não devem alterar a sua eficácia como lubrificantes.

O refrigerante não deve ser corrosivo para os metais usualmente empregados num sistema de refrigeração e devem ser quimicamente estáveis.

O refrigerante deve ser facilmente disponível, de custo baixo, ambientalmente seguro, não contribuir para a destruição da camada de ozono ou para aumentar o efeito de estufa e ser de fácil manuseio.

A American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) lista mais de 100 refrigerantes, com as designações numéricas próprias, fórmulas químicas, diagramas ph, propriedades termodinâmicas e outras características nos livros "Fundamentals" e "Refrigeration".

Os refrigerantes mais utilizados na indústria podem ser classificados nos seguintes grupos:

- Hidrocarbonetos halogenados
- Hidrocarbonetos puros
- Compostos inorgânicos
- Misturas azeotrópicas
- Misturas não azeotrópicas

**Hidrocarbonetos Halogenados:** São hidrocarbonetos que contêm, na sua composição, um ou mais dos seguintes halogênios: Cl, F e Br (o hidrogênio pode ou não aparecer), como por exemplo:

CCl<sub>3</sub>F - Tricloromonofluormetano, R-11 (CFC-11)  
CHClF<sub>2</sub> - Monoclorodifluormetano, R-22 (HCFC-22)  
CHF<sub>2</sub>CHF<sub>2</sub> - Tetrafluoretano, R-134 (HFC-134)  
CF<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>F - Tetrafluoretano, R-134a (HFC-134a)  
CBrF<sub>3</sub> - Bromotrifluormetano, R-13B1 (B1 indica o no. de átomos de Br)

**Hidrocarbonetos puros:** Seguem a mesma regra de designação dos hidrocarbonetos halogenados (até ao número 300), são adequados especialmente para operar em indústrias de petróleo e petroquímica, como por exemplo:

CH<sub>4</sub> - Metano, R-50 (HC-50).  
CH<sub>3</sub>CH<sub>3</sub> - Etano, R-170 (HC-170).  
CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub> - Propano, R-290 (HC-290).  
CH(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> - Isobutano, R-600a (HC-600a).

**Compostos Inorgânicos:** Estes compostos são designados com 700 + peso molecular, como por exemplo:

- NH<sub>3</sub> - Amónia, R-717.
- CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono, R-744.
- SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre, R-764.

**Misturas Azeotrópicas:** Uma mistura azeotrópica de duas substâncias é aquela que não pode ser separada em seus componentes por destilação. Um azeótropo evapora e condensa como uma substância simples com propriedades diferentes das de cada um de seus constituintes. Uma mistura azeotrópica apresenta um diagrama de equilíbrio em que as linhas de líquido e vapor saturado se tangenciam em um ponto, condição para qual a mistura se comporta como se fosse uma substância pura de propriedades distintas daquelas dos constituintes.

**Misturas não Azeotrópicas:** São misturas de refrigerantes que se comportam como uma mistura binária, a concentração da fase vapor é distinta da fase líquido quando ambas ocorrem em equilíbrio, a uma dada pressão e temperatura.

#### **Aspetos característicos dos refrigerantes:**

**Toxicidade:** Excluindo o ar, todos os refrigerantes podem causar sufocações se eles estiverem presentes em quantidade suficiente para criar deficiência de oxigenação, porém alguns são realmente prejudiciais mesmo quando estão presentes em pequenas percentagens.

Toxicidade:

- R-11, R-12, R-22, R-170, R-718, Não.
- R-30, R-40, R-717, R-764, Sim.

**Miscibilidade:** A habilidade do refrigerante se misturar com o óleo tem vantagens como fácil lubrificação das partes dos sistemas e relativa facilidade do óleo voltar ao compressor e desvantagens como diluição do óleo no compressor, pobre transferência de calor e problemas de controlo.

Miscibilidade do óleo:

- R-11, R-12, R-22, R-30, R-40, R-170, Sim;
- R-717, R-718, R-764, Não.

**Tendência a fugas:** Aumenta de modo diretamente proporcional à pressão e inversamente proporcional ao peso molecular. O peso molecular está relacionado diretamente com o volume específico do vapor, quanto maior é o peso molecular maior é o volume específico. Ex: R-717, peso mol. 17,0; R-22, peso mol. 86,5 (menor tendência a fugas). 196

**Odor:** Sob o ponto de vista de constatação de fuga, um leve odor pode ser vantajoso, uma vez que uma pequena fuga de refrigerante pode ser detetada e corrigida imediatamente antes que todo o refrigerante se perca ou que haja qualquer dano físico.

Os **freons** são praticamente inodoros, O R-717 e o R-764A têm cheiro forte.

**Humidade:** Embora todos os refrigerantes absorvam humidade em quantidades variáveis, esta deve ser retirada do sistema de refrigeração. A água, quando existente, tem dois efeitos perniciosos: Um é a água não absorvida pelo refrigerante (água livre) que congela nos pontos onde  $t < 0$  °C, isto obstruirá os dispositivos medidores, resultando num bloqueamento do sistema. O segundo é a formação de ácidos corrosivos motivados por reações químicas. Estes ácidos causarão lama, acobreamento e deterioração, dentro do sistema de refrigeração. Os motores dos compressores herméticos podem ser curto-circuitados como resultados de formações ácidas.

**Deteção de Fugas:** Há muitos métodos de deteção de fugas, ou vazamentos, porém os mais comuns são:

- Teste por imersão;
- Teste por bolhas de sabão;
- Teste de fugas (Para hidrocarbonetos halogenados);
- Teste com detetor eletrónico (Para hidrocarbonetos halogenados).

**Inflamabilidade:** Os refrigerantes variam extremamente nas suas possibilidades de queimar ou favorecer a combustão (*Univasf, 2014*).

### **Descrição de alguns fluidos frigorígenos devido á sua importância**

Na instalação que serve como exemplo, o liquido frigorígeno é um hidrocarboneto halogenado. O Fluido que foi escolhido é o **R404A**.

Tal como foi dito anteriormente, este fluido é inodoro tornando extremamente difícil detetar em fase inicial alguma fuga. Acaba por isso também por ser perigoso pois no caso de fuga o abuso de inalação pode causar vários efeitos devastadores no corpo humano e eventualmente a morte.

Um outro fluido que tem sido um pouco falado, e não pelas melhores razões, é o **Amoníaco (NH<sub>3</sub>)**. Este ao contrário do R404A tem um odor fortíssimo bastando uma pequena fuga para causar perturbação imediatamente após inalação. Este é um refrigerante sem impacto ambiental direto pois não destrói a camada de ozono.

Foi um dos primeiros refrigerantes. É usado no campo industrial, em cervejarias, plantas de empacotamento e aplicações similares por causa da alta eficiência do ciclo. Tem um baixo volume específico, um calor latente de vaporização relativamente alto e baixo custo, apesar destas propriedades desejáveis é limitada a aplicações industriais e excluída do condicionamento de ar para conforto por ser altamente tóxico e inflamável, necessitando manuseio especial e possui um odor forte e penetrante, porém cabe ressaltarmos que com o questionamento dos CFC's decorrentes do efeito sobre a camada de ozono, reacende a polémica sobre a viabilidade de utilização do amoníaco em aplicações frigoríficas e o potencial do amoníaco reside em aplicações de refrigeração indireta, onde o circuito frigorífico fica confinado em casas de máquinas, cuja ventilação deve ser cuidadosamente planeada. A utilização de permutadores de placas compactos pode reduzir significativamente o inventário de refrigerante no circuito frigorífico, favorecendo também a aplicação do amoníaco como refrigerante.

Em instalações com amoníaco é facilmente detetado o mesmo a partir de pequeníssimas concentrações (5 ppm) no ar pelo seu cheiro "sui-generis".

Apresenta risco moderado de incêndio e explosão, quando exposto ao calor ou chama. A presença de óleo e outros materiais combustíveis aumenta o risco de incêndio.

Em contato com halogênios, boro, óxido de etileno, platina, triclorato de nitrogênio e fortes oxidantes, pode causar reações potencialmente violentas ou explosivas. Em contato com metais pesados e seus compostos, pode formar produtos explosivos. O contato com cloro e seus compostos, pode resultar na liberação de gás cloroamina. Produz mistura explosiva quando em contato com hidrocarbonetos, sendo também incompatível com aldeído, acético, acroleína, dridrazina e ferrocianeto de potássio.

No estado gasoso é um irritante poderoso das vias respiratórias, olhos e pele.

Dependendo do tempo e do nível de exposição podem ocorrer efeitos que vão de irritações leves a severas lesões corporais.

A inalação pode causar dificuldades respiratórias, bronco espasmo, queimadura da mucosa nasal, faringe e laringe, dor no peito e edema pulmonar. A ingestão causa náusea, vômitos e inchaço nos lábios, boca e laringe. A amônia produz, em contato com a pele, dor, eritema e vesiculação. Em altas concentrações, pode haver necrose dos tecidos e queimaduras profundas. O contato com os olhos em baixas concentrações (10 ppm) resulta em irritação ocular e lacrimejamento. Em concentrações mais altas, pode haver conjuntivite, erosão na córnea e cegueira temporária ou permanente. Reações tardias podem acontecer, como fibrose pulmonar, catarata e atrofia da retina.

A exposição a concentrações acima de 2500 ppm por aproximadamente 30 minutos pode ser fatal (*Alves, V. & Vilela, R., 2004*).

### 3. Estudo teórico de suporte à Ferramenta de Cálculo

Tal como foi referido anteriormente, fiabilidade de um elemento ou sistema, significa continuidade de serviço por um tempo determinado (intervalo de tempo de 0 a  $t$ ) e sujeito a determinadas condições. Esta continuidade de serviço é interrompida por avarias/falhas, as quais são difíceis de determinar quando irão acontecer com precisão e exatidão. É esta imprecisão e inexactidão que levam a Fiabilidade de qualquer tipo de sistema ou elemento a assentar em probabilidades e estatísticas de falha ou avaria.

Sendo assim a fiabilidade é uma função dependente do tempo. A sua representação  $R(t)$  é.

Assumindo  $k$  como número de falhas e  $T$  como tempo efetivo de funcionamento, o número de falhas por unidade de tempo, mais conhecido como taxa de falhas, é calculado por:

$$\lambda = \frac{k}{T}$$

Para uma taxa de falhas constante, a fiabilidade tem uma distribuição exponencial ou seja, uma distribuição de Poisson para  $k = 0$ .

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \Leftrightarrow e^{-\lambda(t)t}$$

Infelizmente as taxas de falhas dos componentes não costumam ser rigorosamente constantes ao longo da vida dos equipamentos. Este comportamento é descrito por uma distribuição *bathtub* (em forma de banheira) que vai buscar o seu nome ao aspeto gráfico da sua função taxa de falhas de três troços, conforme se ilustra na figura 2.

No período inicial (mortalidade infantil) essa taxa é tipicamente maior devido aos defeitos de projeto e fabrico; no chamado período de vida útil o seu valor médio mantém-se razoavelmente estacionário; após o envelhecimento a taxa de falhas volta a subir (período de desgaste), porque o componente já ultrapassou o seu período de vida útil.

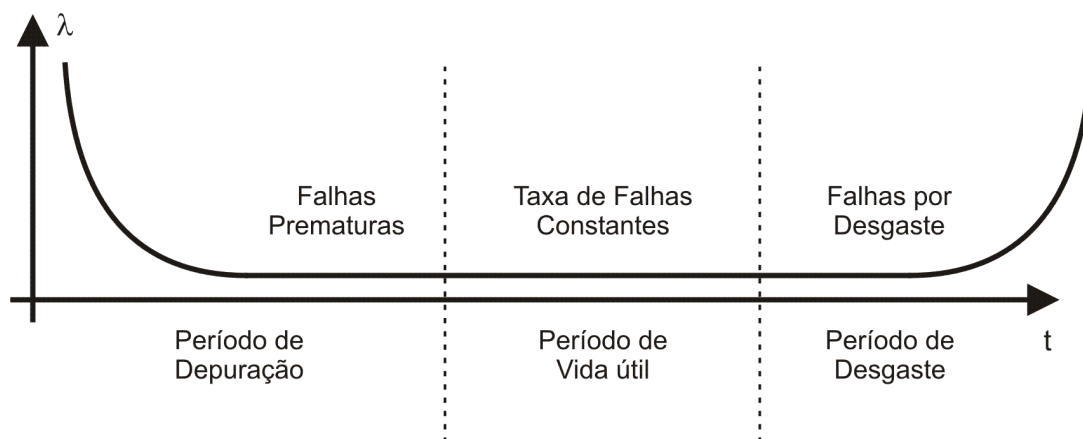


Figura 2 - Curva da Banheira

Uma perspetiva um pouco mais detalhada, na qual estão presentes as três distribuições, permite entender melhor a curva resultante e quais os fatores predominantes para o seu comportamento.

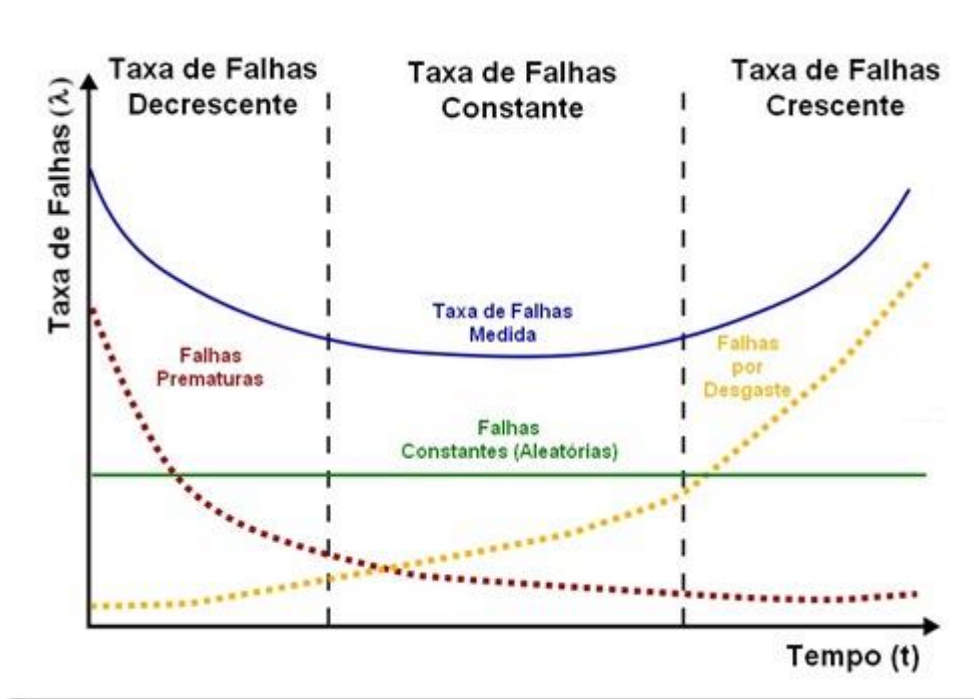


Figura 3 - Curva da banheira mais detalhada

Surge assim a necessidade de se definirem parâmetros que caracterizem os vários períodos que existem desde o início da vida útil do sistema (ou elementos deste) até ao seu fim de vida (Lemos, B., 2010):

**MTTF** – (Mean Time To Fail) Tempo médio até a falha;

**MTBF** – (Mean Time Between Failures) Tempo médio entre falhas no caso de existir reparação;

**MTTR** – (Mean Time To Repair) Tempo médio de reparação;

**MDT** – (Mean Down Time) Tempo médio de paragem;

Atendendo á diversidade de sistemas que existem hoje em dia, foi necessário estruturar o estudo de fiabilidade nos vários sistemas. Existem sistemas que são constituídos por vários elementos, os quais se podem encontrar em termos de fiabilidade em Serie, em Paralelo ou numa combinação dos dois modos. Interessa então estudar os vários tipos de constituição de sistemas.

**Fiabilidade de sistemas com elementos associados em serie**

Quando os elementos ficam combinados de tal modo que a falha de qualquer um origina a falha do sistema diz-se que estão associados em “série”. Nessas condições a fiabilidade do sistema obtém-se por:

$$R_S = R_a * R_b$$

No caso de elementos com taxas de falhas constante  $\lambda_a$  e  $\lambda_b$  resulta em:

$$R_a = e^{-\lambda_a t}, R_b = e^{-\lambda_b t}, R_S = R_a * R_b = e^{-(\lambda_a + \lambda_b)t}$$

De salientar que quando falamos em elementos em serie, falamos em termos de fiabilidade e não em termos de montagem física.

**Redundância ativa plena**

Pode dizer-se que, do ponto de vista da fiabilidade, há elementos em “paralelo” quando só a falha de todos origina a falha do sistema:

$$R_S = 1 - (1 - R_a)(1 - R_b) = R_a + R_b - R_a R_b$$

No caso de elementos com taxas de falhas constante  $\lambda_a$  e  $\lambda_b$  resulta em:

$$R_S = R_a + R_b - R_a R_b = e^{-\lambda_a t} + e^{-\lambda_b t} - e^{-(\lambda_a + \lambda_b)t}$$

**Redundância ativa parcial**

Nos casos de redundância em “paralelo” em que existam mais do que dois elementos podem considerar-se soluções de funcionamento admitindo a falha de alguns deles.

No caso de elementos semelhantes que possuam uma fiabilidade  $R(t)$  e conseqüentemente uma probabilidade de falha (ou indisponibilidade)  $Q(t) = 1 - R(t)$ , pode-se usar a fórmula de Bernoulli para as probabilidades de falhas em vários elementos, admitindo que durante as várias falhas não existe reparação das mesmas.

A fiabilidade de um sistema com  $n$  elementos que admita  $k$  falhas ( $k < n$ ) obtém-se por:

$$R_S(t) = R^n + nR^{n-1}(1 - R) + \frac{n(n-1)}{2!}R^{n-2}(1 - R)^2 + \dots + \frac{n!}{k!(n-k)!}R^{n-k}(1 - R)^k$$

A redundância ativa plena é um caso particular desta em que  $k=n-1$ .

É habitual referir este tipo de situação como o caso dos sistemas redundantes que necessitam do funcionamento de pelo menos  $r$  entre  $n$  elementos em que  $r=n-k$ ;

Utiliza-se para o efeito uma notação em que, p. ex. a representação 2oo3 indica o caso de “pelo menos 2 de entre 3”.

Exemplos:

Caso **1oo2**, ou seja exigência do funcionamento de pelo menos 1 entre 2 dispositivos associados ( $n = 2, r = 1, k = n - r = 1$ ):  $R_s = R^2 + 2R(1 - R) = 2R - R^2$ ;

Caso **2oo2** ( $n = 2, r = 2, k = 0$ ):  $R_s = R^2$ ;

Caso **1oo3** ( $n = 3, r = 1, k = 2$ ):  $R_s = R^3 + 3R^2(1 - R) + 3R(1 - R)^2 = 1 - (1 - R)^3$ ;

Caso **2oo4** ( $n = 4, r = 2, k = 2$ ):  $R_s = R^4 + 4R^3(1 - R) + 6R^2(1 - R)^2 = 3R^4 - 8R^3 + 6R^2$ ;

### ***Redundância ativa condicional***

Nos casos de redundância em “paralelo” em que existam mais do que dois elementos, a fiabilidade também pode ser definida pela maioria dos resultados dos elementos presentes, ou seja, através de um elemento com a função de decisão do resultado global a partir dos resultados dos elementos que constituem o sistema. Geralmente estes elementos com a função de decisão são os autómatos programáveis;

Este tipo de redundância não será aqui aprofundada pois não foi introduzida na ferramenta desenvolvida.

### ***Probabilidade de falha à chamada***

À probabilidade de falha de um sistema num intervalo de tempo T, durante o qual não sejam feitas inspeções nem reparações, também se chama probabilidade de falha à chamada.

**PF**D – (Probability of Failure on Demand)

O seu valor médio obtêm-se por:

$$PFD_{med}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T (1 - R_s(t)) dt$$

Este conceito aplica-se aos equipamentos ou sistemas que se espera que funcionem quando necessário, mas cujas avarias não são diagnosticadas antes da necessidade de atuação ou da próxima inspeção/manutenção.

### ***Sistemas reparáveis com falhas detetáveis***

Conhecendo a taxa de falhas ( $\lambda$ ) ou o *MTTF* de cada elemento, e ainda a respetiva taxa de reparação ( $\mu$ ) e o tempo médio de paragem (*MDT*), é possível estimar o *MTTF<sub>s</sub>* dos sistemas, bem como a taxa média de falhas ( $\lambda_s$ ) e a disponibilidade (*A*) ou a indisponibilidade (*U*).

Para um único elemento a indisponibilidade (ou PFD) é dada por:  $U \approx \lambda MDT$

**Sistemas reparáveis com falhas não detetáveis**

Nestas situações onde não é possível a reparação imediata de elementos redundantes, apenas após intervalos de tempo predefinidos onde se possa proceder à inspeção e à eventual reparação, irão ocorrer falhas do sistema se for ultrapassada a margem de falhas possíveis pelo esquema de redundância existente.

**Falhas múltiplas com causa comum**

A eficácia das soluções redundantes nem sempre é conseguida plenamente, sendo o principal motivo a falta de independência entre as fiabilidades das unidades associadas. Quando isto acontece torna-se verdadeiramente difícil o estudo de esquemas de redundância.

Na fase de projeto/conceção se não existir precaução e atenção para evitar estas situações, facilmente se anula a independência entre as fiabilidades das unidades associadas;

A quantificação do efeito das causas comuns de falha na fiabilidade de um sistema redundante pode ser formulada de um modo simples, colocando em “serie” com o conjunto redundante um bloco fictício com a taxa de falhas com causa comum ( $\lambda_{CCF}$ ). Como este fica em serie o seu efeito torna-se facilmente predominante!

O método de cálculo muitas vezes adotado é o chamado modelo  $\beta$ . Este consiste em atribuir a ( $\lambda_{CCF}$ ) uma proporção  $\beta$  da taxa de falhas de cada elemento:  $\lambda_{CCF} = \beta\lambda$

**Modos de falha, de diagnóstico e as suas consequências**

O estudo de fiabilidade em elementos em separado ou em sistemas na maioria das situações é normalmente orientada para a continuidade de serviço, considerando assim as falhas que causem a sua paragem de funcionamento. Na perspetiva da segurança, os modos de falha requerem outro tipo de distinção:

- **Modos seguros** de falha (fail-safe) – São falhas que afetam o funcionamento de um sistema causando a sua paragem mas sem representar perda fatal de segurança;
- **Modos perigosos** de falha (fail-danger) – São todas as falhas que comprometem a segurança do sistema;

Nos sistemas com diagnóstico automático é importante considerar também os **modos de falha de aviso** que possam impedir os órgão de diagnóstico de detetar a ocorrência de estados de falhas perigosas nos equipamentos vigiados.

Em sistemas com diagnóstico automático, cada um dos modos de falha pode ser detetável ou não detetável, ou ainda parcialmente detetável por insuficiência de cobertura do sistema de diagnóstico. As taxas de falhas, **supostas constantes**, a considerar na análise de segurança de cada componente passam a ser:

$\lambda_{SD}$	Taxa de falhas seguras detetáveis
$\lambda_{SU}$	Taxa de falhas seguras indetetáveis
$\lambda_{DD}$	Taxa de falhas perigosas detetáveis
$\lambda_{DU}$	Taxa de falhas perigosas indetetáveis

As mesmas relacionam-se com as respetivas taxas de falhas em bruto pelas correspondentes coberturas do sistema de diagnóstico por:

$$\begin{aligned}\lambda_{SD} &= C_S \lambda_S \\ \lambda_{SU} &= (1 - C_S) \lambda_S \\ \lambda_{DD} &= C_D \lambda_D \\ \lambda_{DU} &= (1 - C_D) \lambda_D\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_S &= \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \\ \lambda_D &= \lambda_{DD} + \lambda_{DU}\end{aligned}$$

Define-se também a fração de falhas seguras, **SFF** (Safe Failure Fraction), de cada componente da seguinte forma:

$$S_{FF} = \frac{\lambda_{SD} + \lambda_{SU} + \lambda_{DD}}{\lambda_{SD} + \lambda_{SU} + \lambda_{DD} + \lambda_{DU}}$$

O tempo até a falha em modo perigoso passa assim a ser a variável a ter em consideração na análise de segurança, em vez do tempo de vida, anteriormente considerado. Sendo assim “nascem” duas grandezas: O tempo médio até à falha perigosa (**MTTFD** – Mean Time to Fail Dangerously) e o tempo médio até à falha espúria (**MTTFS** – Mean Time to Fail Spuriously).

A **probabilidade de falha à chamada (PFD)** de um sistema de segurança tem de ser calculada especificamente para o modo perigoso de falha;

A **probabilidade de falsa falha (PFS)** do sistema refere-se a falhas que embora indesejáveis, não afetam a segurança;

$$PFD = f(\lambda_{DU}, \lambda_{DD}, T_I)$$

$$PFS = f(\lambda_{SD}, \lambda_{SU}, \lambda_{DU}, T_I)$$

O tempo médio de permanência de uma unidade em situação perigosa inclui agora, além da parcela devida à fração das falhas perigosas indetetáveis, a parcela devida à fração de falhas perigosas detetáveis e reparáveis de imediato:

$$MDT \approx \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{T}{2} + T_r \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} T_r$$

A taxa média de falhas perigosas é  $\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$ . Desprezando  $T_r$  (Tempo reparação) face a  $T$  (intervalo médio entre manutenções/inspeções), a probabilidade de falha à chamada em modos perigosos num dado intervalo, para uma unidade tem o valor aproximado:

$$PFD \approx \lambda_{DU} \left( \frac{T}{2} + T_r \right) + \lambda_{DD} T_r \approx \lambda_D MDT$$

No caso de um sistema com redundância **1oo2** tem-se, para as falhas perigosas:

$$MDT_s \approx \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \left( \frac{T}{3} + T_r \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} T_r$$

$$PFD_s \approx \lambda_D^2 T MDT_s \approx 2\lambda_D^2 MDT MDT_s$$

Mas nos sistemas redundantes há que ter em conta as falhas com causas comuns, o que se faz normalmente recorrendo ao modelo  $\beta$ , discriminando ainda mais o fator  $\beta$  nas frações  $\beta_D$  e  $\beta_U$  de falhas com causa comum, detectáveis e não detectáveis, respetivamente. No caso **1002**, e na sequência das expressões simplificadas antecedentes, chega-se a:

$$PFD_s \approx 2[(1 - \beta_U)\lambda_{DU} + (1 - \beta_D)\lambda_{DD}]^2 MDT MDT_s + \beta_U \lambda_{DU} \left( \frac{T}{2} + T_r \right) + \beta_D \lambda_{DD} T_r$$

Para o caso **2003** encontra-se:

$$PFD_s \approx 6[(1 - \beta_U)\lambda_{DU} + (1 - \beta_D)\lambda_{DD}]^2 MDT MDT_s + \beta_U \lambda_{DU} \left( \frac{T_I}{2} + MTTR \right) + \beta_D \lambda_{DD} MTTR$$

No caso **2002** (associação em serie) resulta mais simplesmente:

$$PFD_s \approx 2\lambda_D MDT$$

Na ferramenta desenvolvida, nesta 1ª fase, apenas está contemplado o estudo de sistemas não perigosos;

Resumidamente em sistemas não perigosos (só estudo de disponibilidade) para os elementos que constituem um sistema, os dados a considerar são os seguintes:

$\lambda$	Taxa de falhas total ( $h^{-1}$ )
$\lambda_D$	Taxa de falhas detetáveis ( $h^{-1}$ )
$\lambda_U$	Taxa de falhas não detetáveis ( $h^{-1}$ )
$C_D$	Cobertura do diagnóstico de falhas detetáveis
$C_U$	Cobertura do diagnóstico de falhas não detetáveis
$T_r$	Tempo médio de reparação ( $h$ )
$T$	Intervalo entre manutenções ( $h$ )

E os cálculos a efetuar:

Tempo médio de paragem do elemento ( $MDT$ ):

$$MDT \approx \frac{\lambda_U}{\lambda} \left( \frac{T}{2} + T_r \right) + \frac{\lambda_D}{\lambda} T_r$$

Probabilidade média de falha à chamada do elemento ( $PFD$ ):

$$PFD \approx \lambda MDT \approx \lambda_U \left( \frac{T}{2} + T_r \right) + \lambda_D T_r$$

Para os sistemas, para além dos dados anteriores, é necessário considerar também os dados referentes a elementos em redundância.

$\beta_D$	Fator de falhas detetáveis com causa comum
$\beta_U$	Fator de falhas não detetáveis com causa comum

Os cálculos a efetuar são os seguintes:

Tempo médio de paragem do sistema ( $MDT_S$ ):

$$MDT_{1002} \approx \frac{\lambda_U}{\lambda} \left( \frac{T}{3} + T_r \right) + \frac{\lambda_D}{\lambda} T_r$$

Probabilidade média de falha à chamada do sistema ( $PFDS$ ):

$$PFDS_{1002} \approx (1 - \beta) \lambda MDT_{1002} + \beta \lambda T MDT$$

$$PFDS_{1002} \approx [(1 - \beta_U) \lambda_U + (1 - \beta_D) \lambda_D]^2 MDT MDT_{1002} + \beta_U \lambda_U \left( \frac{T}{2} + T_r \right) + \beta_D \lambda_D T_r$$

Para um sistema composto como o exemplo exposto (Sistema em Serie e em Paralelo) a Probabilidade média de falha à chamada do sistema é calculada por (**Palma, J. & Cordeiro, A., 2009**):

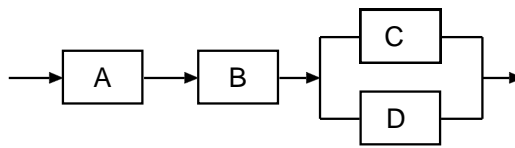


Figura 4 - Sistema composto

$$PFDS \approx PFDA + PFD_B + PFD_{CD}$$

## 4. Apresentação do Caso Prático a estudar

Para exemplificar a metodologia anteriormente apresentada, ir-se-á efetuar o estudo de fiabilidade para uma instalação já existente, e a partir dos resultados efetuar várias alterações hipotéticas com o objetivo de aumentar a fiabilidade da instalação. A alta eficiência, hoje em dia tem-se tornado cada vez mais importante não só devido às crescentes preocupações com o meio ambiente e com um futuro mais risonho, mas também porque cada vez mais os utilizadores finais (clientes) já concluíram que uma instalação com índices altos de eficiência acabam por a médio longo prazo tornarem-se menos dispendiosas e com melhores resultados relativamente ao objetivo primário da instalação que é a capacidade de retirar calor de dentro das câmaras e consequentemente dos produtos armazenados nas mesmas.

Devido à enorme panóplia de equipamentos existentes na instalação focar-se-á apenas os mais importantes. O estudo de uma instalação frigorífica, no seu todo incluindo todos os equipamentos, do mais simples ao mais complexo, torna-o demasiado moroso e ultrapassa o âmbito do presente trabalho.

Atendendo ao indicado anteriormente e considerando apenas os equipamentos ditos essenciais tal como já explicado o estudo focará apenas os seguintes equipamentos:

- Compressores;
- Condensadores (Exterior);
- Válvulas de expansão;
- Evaporadores (Câmaras);

A instalação em estudo considerando apenas os equipamentos mais importantes abrange os seguintes itens:

### Consumidores de frio

#### Câmara de Congelados

Dimensões interiores (C x L x A)	30,00 x 21,50 x 9,50m
Área interior	645m <sup>2</sup>
Volume interior	6.128m <sup>3</sup>

#### Condições de funcionamento:

Temperatura de serviço	- 23°C
------------------------	--------

#### Cais de Movimentação

Dimensões interiores (C x L x A)	23,50 x 7,00 x 3,50m
Área interior	165m <sup>2</sup>
Volume interior	576m <sup>3</sup>

#### Condições de funcionamento:

Temperatura de serviço	+7°C
------------------------	------

#### Instalação frigorífica

A instalação é composta por 2 (dois) circuitos frigoríficos, de funcionamento automático por expansão direta do fluido refrigerante R404A.

### **Circuito frigorífico N.º 1**

O circuito n.º1 é constituído por 2 (dois) compressores frigoríficos do tipo parafuso, de um andar de compressão e por 1 (um) condensador do tipo evaporativo, com as seguintes características unitárias:



*Figura 5 - Central de compressores – Circuito frigorífico nº 1*

### Compressores

Marca	“Bitzer”
Modelo	HSN7451-60-40P
Quantidade	2
Fluido refrigerante	R404A
Potência frigorífica a -32/+35°C (Tevap./Tcond.)	66,40kW
Potência absorvida do compressor	44,30kW
C.O.P.	1,5
Potência nominal do motor elétrico do compressor	60CV / 400V / 50Hz



Figura 6 - Compressor refrigerante do circuito nº 1

### Condensador

Marca	“EVAPCO”
Modelo	LSCB 75
Quantidade	1
Fluido refrigerante	R404A
Potência de rejeição:	237kW
Motor do ventilador	4,0kW
Motor da bomba de água	0,56kW
Caudal de ar	5,4m <sup>3</sup> /s
Caudal de água em recirculação	8dm <sup>3</sup> /s
Proteção anticorrosiva	Evapcoat
Dimensões (C x L x A)	1,826 x 1,235 x 2,616m
Peso em operação	1.950 kg

Nota: O condensador foi fornecido com bomba de água de reserva não montada.



Figura 7 - Condensador Evaporativo

### Circuito frigorífico N.º 2

O circuito n.º 2 é composto por 1 (uma) unidade condensadora, com condensador arrefecido a ar, equipada com compressor frigorífico do tipo semi-hermético, alternativo, de um andar de compressão, e com as seguintes características unitárias:

#### Unidade condensadora

Marca	“Centauro/Bitzer”
Modelo	CBS 135 V2 / 4PC - 15.2Y
Quantidade	1
Fluido frigorígeno	R404A
Potência frigorífica a -1/+35°C (Tevap./Tamb.)	33,60kW
Potência absorvida do compressor	12,46kW
Potência nominal do motor elétrico do compressor	15CV / 400V / 50Hz
Nº x diâmetro dos ventiladores do condensador	2 x 500mm
Potência dos motores dos ventiladores	2 x 780W
Volume do depósito	30dm <sup>3</sup>



Figura 8 - Circuito frigorífico nº 2

### Evaporadores

Os evaporadores são unidades de circulação forçada de ar, com bateria em tubo de cobre e alhetas em alumínio, com as seguintes características principais e distribuição:

#### Câmara de Congelados

Marca	“Centauro”
Modelo	DDL/E 10256
Quantidade	3
Tipo	cúbico
Potência frigorífica	31,38kW
Espaçamento de alhetas	10mm
Caudal de ar	36.000m <sup>3</sup> /h
Projeção de ar	30m
Superfície	255,11m <sup>2</sup>
Volume interno	110,88dm <sup>3</sup>
Nº x diâmetro dos ventiladores	3 x 600mm
Potência dos motores dos ventiladores	4.050 W
Descongelação	Gás quente



Figura 9 - Evaporador da Câmara de Congelados

### Cais de Movimentação

Marca	“Centauro”
Modelo	CB 206
Quantidade	2
Tipo	cúbico
Potência frigorífica	14,62kW
Espaçamento de alhetas	2,8mm
Caudal de ar	6.600m <sup>3</sup> /h
Projeção de ar	7m
Superfície	100m <sup>2</sup>
Volume interno	15dm <sup>3</sup>
Nº x diâmetro dos ventiladores	6 x 300mm
Potência dos motores dos ventiladores	438W



Figura 10 - Evaporador do Cais

### **Quadro elétrico geral**

O quadro elétrico geral de comando e proteção da instalação frigorífica é de construção do tipo encapsulado, com caixa metálica em chapa ZINCOR de 2 mm de espessura, com pintura em esmalte após aplicação de primário anticorrosivo.

A aparelhagem inserida no quadro é das marcas “Schneider”, “Omron”, “Finder”, “Weidmueller” e “Danfoss”.

As funções do quadro elétrico geral são as seguintes:

Alimentação, proteção, corte geral e seccionamento dos equipamentos elétricos da instalação, sendo o poder de corte dos equipamentos de proteção de 6kA;

Controlo automático dos compressores e do arranque e paragem de todos os equipamentos envolvidos (ventiladores, válvulas elétricas, etc.);

Alimentação, arranque e proteção (termomagnética e diferencial) de todo o equipamento.



*Figura 11 - Quadro elétrico da instalação*

### **Instalação elétrica de comando e força motriz**

A instalação elétrica de comando e força motriz dos consumidores de frio está executada à vista com cabos do tipo VV, assentes em abraçadeiras ou calha para caminho de cabos de acordo com as normas e regulamentos vigentes para os circuitos de baixa tensão.

## **Sistema de automação**

### **Controlo e automação**

O sistema de comando e controlo compreende 1 (um) autómato central da marca "Omron" no quadro elétrico geral da instalação frigorífica, equipado com entradas e saídas dimensionadas para responder adequadamente a toda a instalação.

O autómato encarrega-se de controlar e comandar o funcionamento de todos os equipamentos, nomeadamente compressores, condensadores, evaporadores.

Todos os órgãos de segurança dos equipamentos são ligados ao autómato de forma a garantir permanentemente o seu correto funcionamento.

O autómato disponibiliza funções destinadas a promover economias de energia, como as seguintes:

- Equilíbrio nas horas de funcionamento dos compressores;
- Possibilidade de anulação ou gestão do funcionamento nas horas de ponta;
- Possibilidade de definição de diferentes set-points, consoante o tarifário de eletricidade;
- Recuperação de temperatura nas horas de vazio;
- Alerta de manutenção em função das horas de funcionamento dos compressores;

O controlo de funcionamento dos diversos equipamentos inclui sempre a possibilidade de funcionamento manual através de interruptores do tipo Manual-Desligado-Automático.

### **Sistema de supervisão**

O sistema de supervisão assenta fundamentalmente no autómato existente na instalação.

Para monitorização e registo do estado de funcionamento da instalação o autómato está interligado pela rede de comunicações a 1 (um) PC de supervisão.

Além das funções de supervisão e automação da instalação frigorífica, este computador efetua também o registo das temperaturas, com monitorização em tempo real e elaboração de relatórios de históricos em forma de gráfico, sob pedido do operador.

Registo sistemático de todas as ocorrências principais;

Registo sistemático de todos os alarmes de funcionamento e de ultrapassagem dos parâmetros de temperatura definidos para cada local;

Envio por modem GSM, alarmes para telemóvel;

Registo sistemático das variáveis analógicas monitorizadas, juntamente com a sua identificação e data/hora, sendo agrupadas por tipo;

Geração e visualização/impressão de gráficos diários/semanais/mensais, das temperaturas de todos os espaços, a pedido do operador;

Possibilidade de comando à distância de evaporadores (ligados/desligados), a partir dos sinópticos de cada espaço;

Parametrização de todos os tempos referentes às temporizações de funcionamento e alteração de “set-points”;

Possibilidade de back-up em disco dos registos de temperatura das câmaras e alarmes de funcionamento, a pedido do utilizador;

Possibilidade de forçar descongelações;

Possibilidade de diagnóstico das causas dos alarmes antes da intervenção dos serviços de Assistência Técnica.

#### **O sistema de supervisão contempla os seguintes equipamentos:**

Autómato programável “Omron”;

Consola de diálogo instalada junto ao autómato;

Software de supervisão;

1 PC, 1 modem e 1 impressora a jato tinta;

Cabos e conversores;

Módulo de alarme GSM para telemóvel;

Sondas de temperatura;

Fonte de alimentação;

Cabos e fichas de ligação;

## 5. Descrição do Sistema e Processamento de dados para o Estudo

De acordo com as características da instalação, e no seguimento da mesma filosofia, (estudo dos equipamentos mais importantes, o diagrama de funcionamento da instalação é o seguinte:

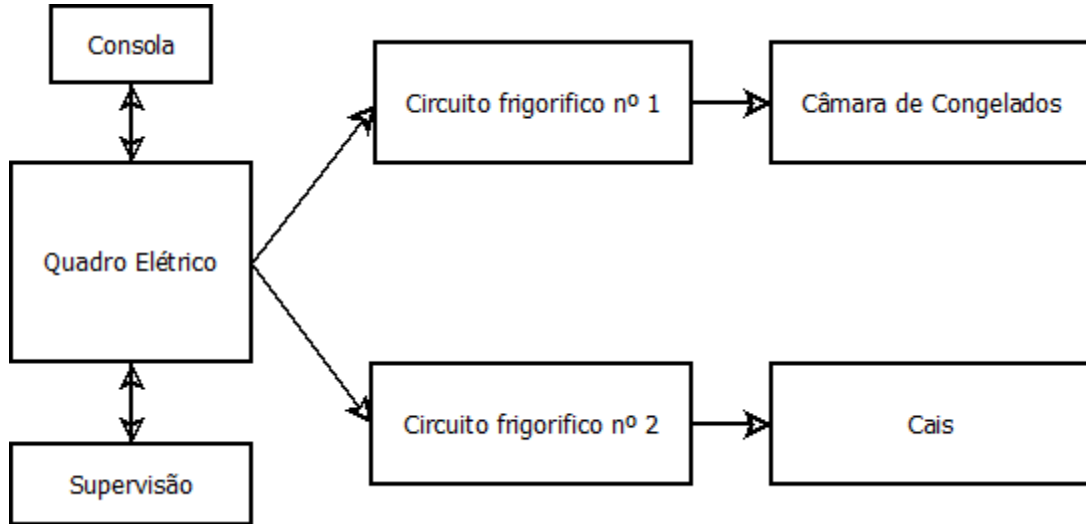


Figura 12 - Diagrama da instalação

Relativamente ao Circuito frigorífico nº 1 o fluxograma é o seguinte:

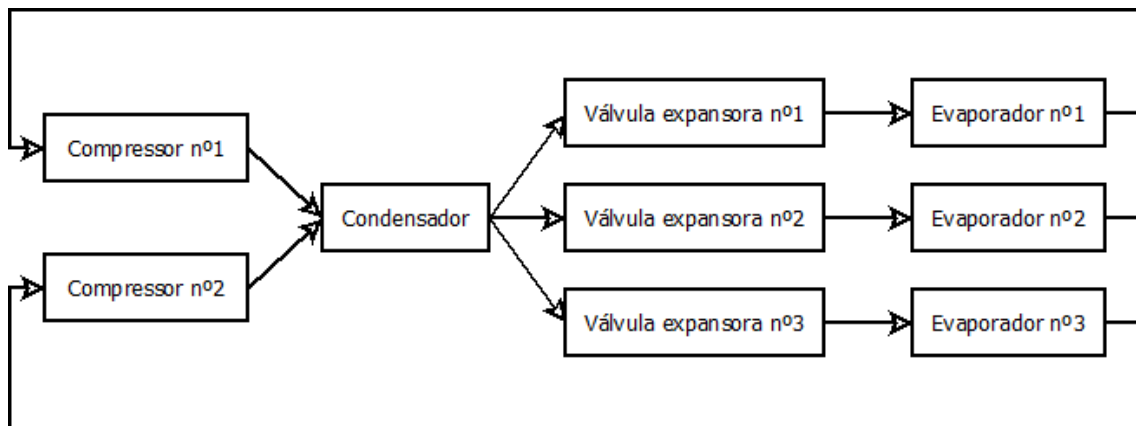


Figura 13 - Diagrama do circuito frigorífico nº 1

Relativamente ao circuito frigorífico nº 2 o fluxograma é o seguinte:

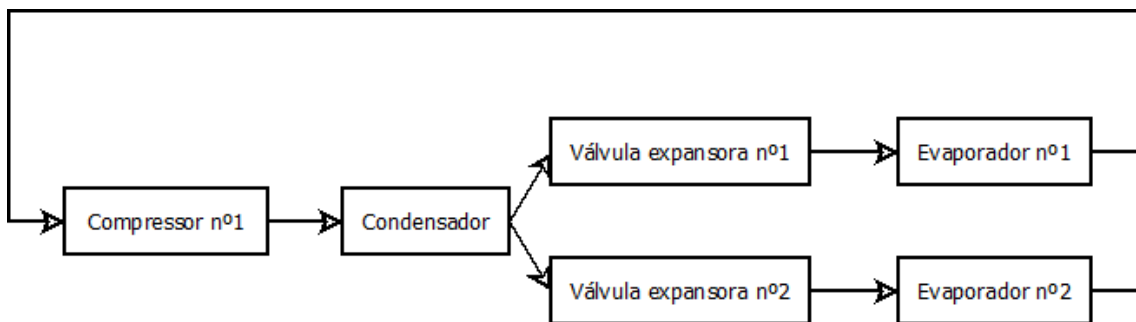


Figura 14- Diagrama do circuito frigorífico nº 2

Tal como foi dito anteriormente, o âmbito deste trabalho é na área da automação, logo, só iremos focar o nosso estudo nessa mesma área. Atendendo as características da instalação, o fluxograma do circuito de automação simplificado pode representar-se pelo seguinte:

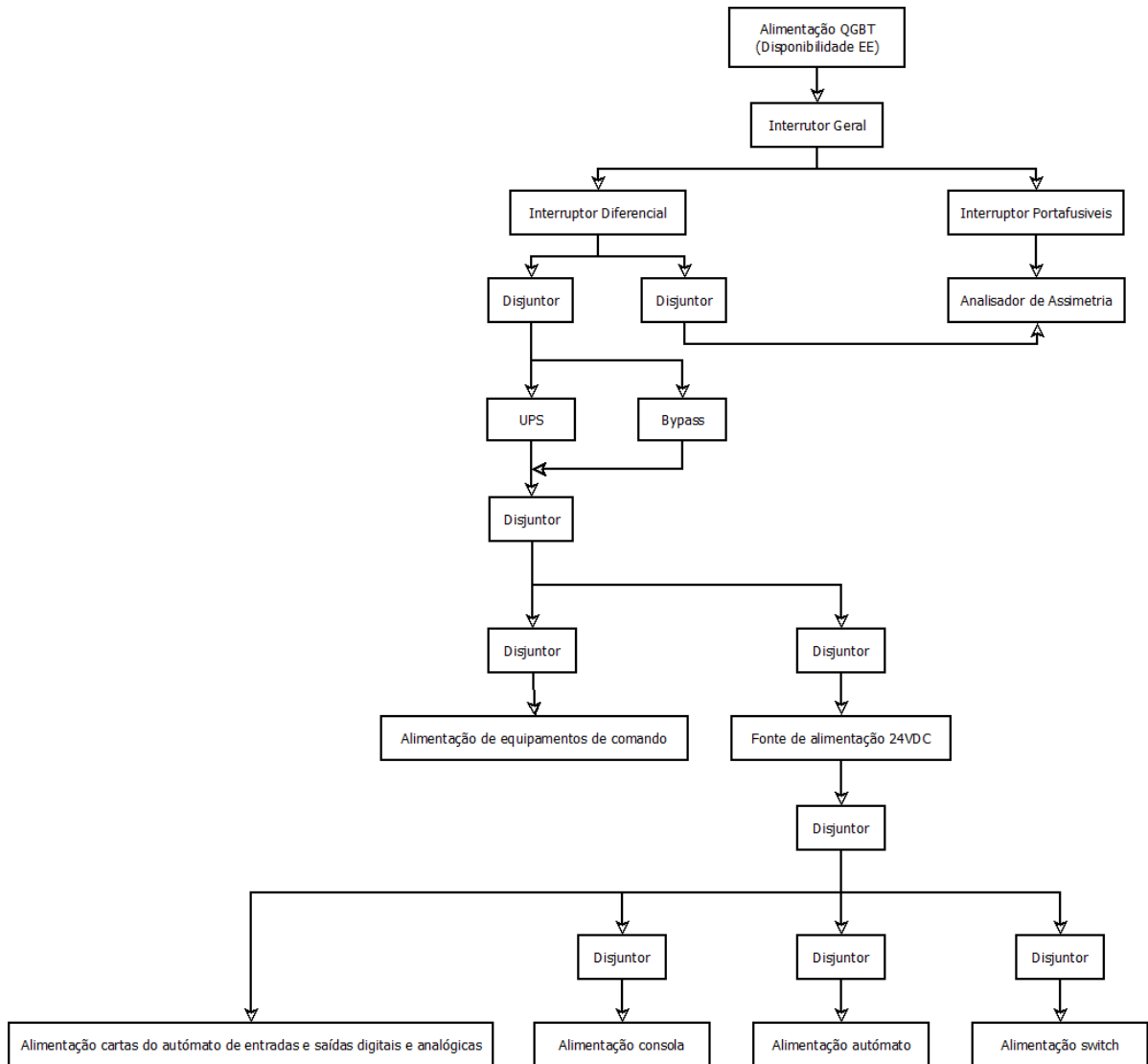


Figura 15 – Fluxograma do circuito de automação

Dos equipamentos expostos, salientamos os seguintes pressupostos:

**Alimentação QGBT** – Está é a alimentação do quadro geral de frio. Qualquer falha, seja por falta de tensão, seja por alimentação deficiente (falha de uma fase, sobretensão, subtensão, etc) o quadro geral de frio fica incapacitado.

**Analisador de assimetria** – Este equipamento tem como função em tempo real analisar a qualidade da energia elétrica que é fornecida pelo QGBT. Em caso de situações como as referidas anteriormente na explanação da alimentação do QGBT, o circuito de comando é desligado, e por conclusão, o sistema para. Em caso de avaria do analisador de assimetria também o sistema para.

**UPS** – Este equipamento tem como principal função o fornecimento de energia a todo o circuito de comando de energia interruptamente. Em caso de falha da UPS, o sistema está pensado para realizar um *bypass* á UPS;

**Fonte de alimentação 24Vdc** – Este equipamento tem como função alimentar o autómato (CPU), cartas de entradas e saídas (digitais e analógicas), consola (Interface homem-máquina) e *switch* (usado para garantir a comunicação entre autómato, consola e computador).

**Equipamentos de comando** – Estes são pequenos controladores que têm como função controlar o pedido de frio para a câmara de congelados e para o cais, e comunicar ao autómato qual a temperatura na câmara de congelados e no cais.

De todos os equipamentos expostos apenas alguns são relevantes para a continuidade de serviço. Existem equipamentos que complementam a instalação mas que a avaria dos mesmos não compromete a continuidade de serviço, tal como o *switch*, a consola, e o computador.

Para este estudo não foi possível obter por parte dos fabricantes os valores oficiais de taxas de falhas de cada equipamento, pelo que foram usados valores padrão, tais como os seguintes:

Equipamento	Taxa de falhas
Analizador de assimetria	1,389E-08
UPS	2,28311E-05
Fonte de alimentação 24Vdc	1,36512E-05
Transformador 230V/24V	1,74486E-09
Transformador 400V/230V	1,74486E-09
Autómato	3,80518E-06
Disjuntor	1,14155E-06
Consola HMI	2,85388E-05
Computador	0,0002
Interruptor Geral	1,14155E-06

Tabela 1 - Valores de taxa de falhas de alguns equipamentos.

Estes valores padrão foram determinados a partir de folhetos técnicos de fabricantes; *softwares* de cálculo de fiabilidade, documentos oficiais de fabricantes conceituados, etc...

Raros são os equipamentos onde os fabricantes disponibilizam os dados das taxas de falhas. Como tal é necessário a partir dos dados fornecidos pelos fabricantes calcular os mesmos. Junto apresentamos alguns exemplos de cálculos;

**Cálculos exemplo de alguns valores padrão:****Analizador de assimetria.**

Como exemplo vamos explorar o relé de controlo de fases multifunções da marca **Schneider Electric** modelo RM35TF30 (*Schneider Electric, 2011*). Os parâmetros controlados numa rede trifásica por este relé são os seguintes:

- Assimetria;
- Deteção de falha de fase;
- Sequência de fases;
- Subtensão e Sobretensão;

Segundo o folheto técnico deste equipamento, o mesmo terá uma durabilidade elétrica de 100 000 ciclos, durabilidade metálica de 30 000 000 ciclos para um rácio de funcionamento menor que 360 operações por hora.

O tempo médio até a falha (MTTF) obtêm-se pelo quociente entre o tempo total efetivo de serviço de um elemento e o número de falhas desse mesmo elemento.

$$MTTF = \frac{T}{k}$$

Para este relé o tempo total efetivo de serviço serão os 100 000 ciclos de durabilidade elétrica; Admitindo que não existem defeitos na alimentação do relé, o mesmo estará sempre na mesma posição (elétrica e mecânica). Vamos admitir períodos de manutenção com intervalos de 1 mês para apertos ao quadro elétrico e ensaio de proteções elétricas;

$$1\text{Mês} \approx 30 \text{ dias} = 30 \times 24 = 720 \text{ horas};$$

Assumimos um mês para o cálculo da taxa de falhas do relé.

Sendo assim o relé realizará 1 ciclo a cada 720 horas, ou seja, aproximadamente 0,001389 ciclos por hora;

$$MTTF_{\text{Analizador assimetria}} = \frac{100\,000}{0,001389} \approx 71994240,4607 \text{ h}$$

$$\lambda_{\text{Analizador assimetria}} = \frac{1}{MTTF_{\text{Analizador assimetria}}} \Leftrightarrow \lambda_{\text{Analizador assimetria}} \approx 1,389 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$$

## UPS

Relativamente às UPS, existe uma grande variedade no mercado. No caso em estudo utilizou-se a UPS Online, com uma potência máxima de 3000VA.

Segundo alguns dos fabricantes mais reconhecidos, o tempo de duração das baterias ronda os **3 a 5 anos** dependendo das condições de funcionamento da UPS.

Este intervalo de tempo acaba por ser o tempo médio entre falhas (MTBF). Embora este seja muitas vezes confundido com o MTTF, este obtêm-se pelo quociente entre o tempo total (de serviço efetivo e paragem) e o número de falhas registadas. Visto este tempo de paragem ser tão pequeno comparativamente com o tempo de serviço pode então assumir-se que o MTTF é aproximadamente igual ao MTBF.

Sendo assim o MTTF de uma UPS é normalmente de 5 anos o que equivale á 43800 horas;

$$MTTF_{UPS} = 5 \times 365 \times 24 = 43800 \text{ h}$$

$$\lambda_{UPS} = \frac{1}{MTTF_{UPS}} \Leftrightarrow \lambda_{UPS} \simeq 2,28311 \times 10^{-5} h^{-1}$$

## Autómato

Segundo a **OMRON**, os seus autómatos têm um tempo de vida útil de pelo menos 30 Anos (**Omron, 2011**); Pelos dados fornecidos pela **Siemens**, os seus autómatos têm um tempo de vida útil ainda maior.

Seguindo o exemplo da UPS vêm:

$$MTTF_{Autómato} = 30 \times 365 \times 24 = 262800 \text{ h}$$

$$\lambda_{Autómato} = \frac{1}{MTTF_{Autómato}} \Leftrightarrow \lambda_{Autómato} \simeq 3,80518 \times 10^{-6} h^{-1}$$

Quando os elementos ficam combinados de tal modo que a falha de qualquer um origina a falha do sistema diz-se que estão associados em “**série**”.

Atendendo á estrutura do circuito de comando (automação), verifica-se que a avaria de um único elemento, coloca em causa o correto funcionamento do sistema. Sendo assim este é maioritariamente um sistema em Serie; Maioritariamente pois analisando o sistema, verifica-se que a UPS em caso de avaria, pode ser contornada pela Rede. A UPS assim acaba por estar em paralelo com a rede, pois basta um destes elementos estar presente para se garantir a continuidade de serviço.

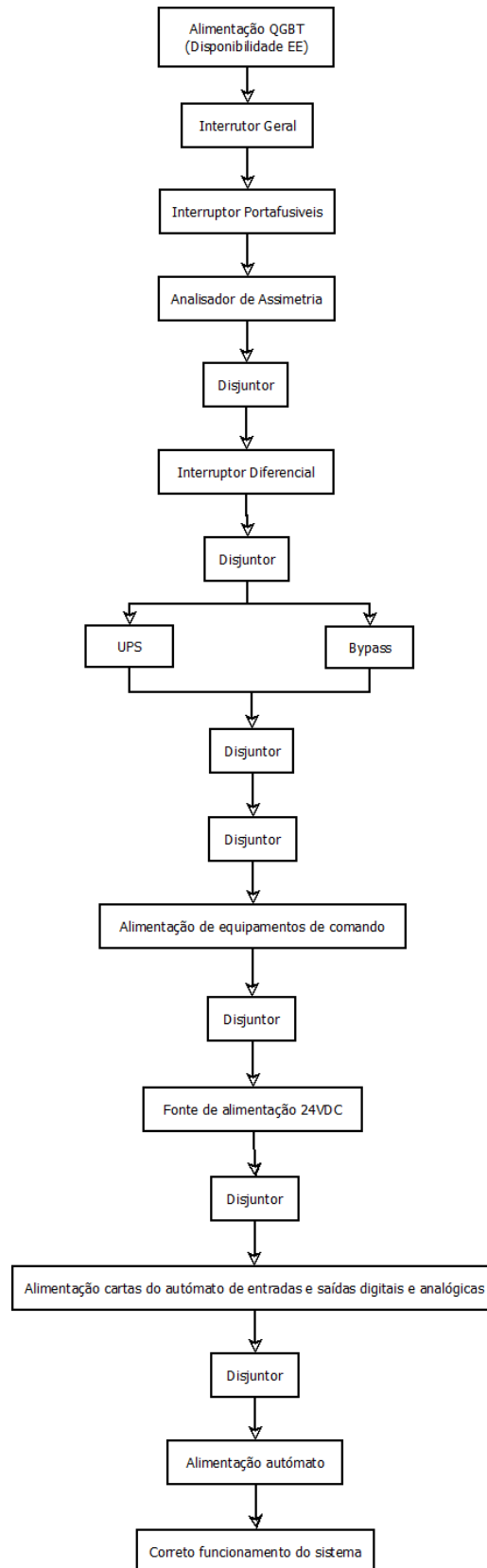


Figura 16 - Diagrama de circuito de comando

Para efetuar o cálculo da taxa de fiabilidade deste sistema é necessário definir alguns pontos importantes.

Considerando a disponibilidade da energia elétrica de cerca de 99,2% e intervalos entre manutenções de três meses, ou seja uma visita trimestral, o cálculo de fiabilidade deste sistema será:

$$R_S = A_{Energia\ eletrica} * R_{Circuito\ comando}$$

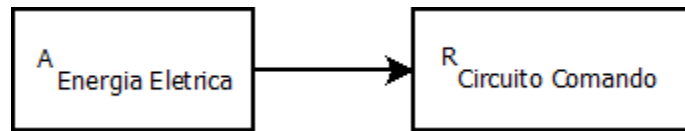


Figura 17 - Diagrama do sistema simplificado

Sendo que:

$$t = 3\ meses = 2190\ horas$$

$$R_{Circuito\ comando} = \prod R_n$$

Tal como calculado anteriormente e definido:

$$\lambda_{Int.Geral} = \lambda_{Int.Porta\ Fusiveis} = \lambda_{Disjuntor} = 1,14155 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_{Anal.Assimetria} = 1,389 \times 10^{-8}$$

$$\lambda_{UPS} = 2,28311 \times 10^{-5}$$

$$\lambda_{Fonte\ de\ Alimentação} = 1,36512 \times 10^{-5}$$

$$\lambda_{Autómato} = \lambda_{Eq.Comando} = \lambda_{Cartas\ automático} = 3,80518 \times 10^{-6}$$

Logo,

$$R_{Int.Geral} = R_{Int.Porta\ Fusiveis} = R_{Disjuntor} = e^{-\lambda_{Int.Geral} \times t} = e^{-(1,14155 \times 10^{-6} \times 2190)} = 0,997503$$

$$R_{Anal.Assimetria} = 0,999997$$

$$R_{UPS} = 0,951229$$

$$R_{Fonte\ de\ Alimentação} = 0,970546$$

$$R_{Autómato} = R_{Eq.Comando} = R_{Cartas\ automático} = 0,991701$$

Tal como verificado anteriormente a UPS tem um sistema de *bypass* em caso de avaria. Este sistema é composto por um relé que sempre que a UPS deixa de debitar corrente cria um Bypass a UPS garantindo assim a continuidade de serviço com alimentação direta da rede.

Como tal é necessário calcular a fiabilidade da UPS mais o sistema de Bypass.

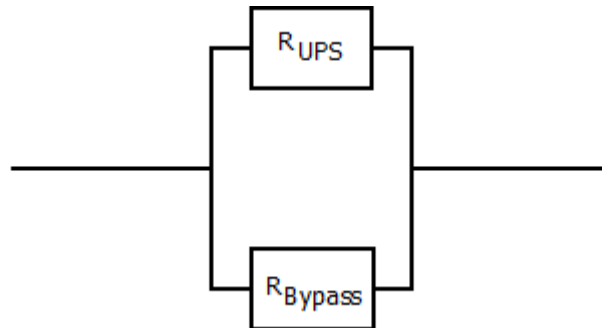


Figura 18 - Diagrama de UPS//Bypass

$$R_{UPS//Bypass} = 1 - [(1 - R_{UPS}) * (1 - R_{Bypass})]$$

A título de exemplo vamos considerar o relé da marca Finder da serie 40, modelo 40.51;

Segundo o fabricante o tempo de vida mecânico AC/DC é de  $10 \times 10^6 / 20 \times 10^6$  ciclos;  
O tempo de vida elétrico à carga nominal AC1 é de  $200 \times 10^3$  ciclos (**Finder, 2013**);

A bobina e o contato estão em serie visto que a falta de um deles compromete o funcionamento do mesmo.

$$R_{Relé} = R_{Bobina} \times R_{contato}$$

$$MTTF_{Bobina AC} = \frac{10 \times 10^6}{N^{\circ} \text{ ciclos por hora}}$$

$$MTTF_{contato} = \frac{200 \times 10^3}{N^{\circ} \text{ ciclos por hora}}$$

Assumindo na mesma 1 ciclo a cada mês dá 1 ciclo a cada 720 horas, logo 0,001389 ciclos a cada hora.

$$MTTF_{Bobina AC} = \frac{10 \times 10^6}{0,001389} = 7,19942404 \times 10^9$$

$$\lambda_{Bobina AC} = \frac{1}{7,19942404 \times 10^9} = 138,9 \times 10^{-12}$$

$$MTTF_{contato} = \frac{200 \times 10^3}{0,001389} = 143,9884809 \times 10^6$$

$$\lambda_{contato} = \frac{1}{143,9884809 \times 10^6} = 6,945 \times 10^{-9}$$

Logo,

$$R_{Bobina\ AC} = e^{-(\lambda_{Bobina\ AC} \times t)} = e^{-(138,9 \times 10^{-12} \times 2190)} = 999,9999 \times 10^{-3}$$

$$R_{contato} = 999,984790 \times 10^{-3}$$

$$R_{Relé} = R_{Bobina\ AC} \times R_{contato} = 999,9844 \times 10^{-3}$$

Tal como calculado anteriormente:

$$R_{UPS//Bypass} = 1 - [(1 - R_{UPS}) * (1 - R_{Bypass})]$$

$$R_{UPS} = 0,951229$$

$$R_{Bypass} = R_{Relé} = 999,9844 \times 10^{-3}$$

$$R_{UPS//Bypass} = 1 - [(1 - R_{UPS}) * (1 - R_{Bypass})] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_{UPS//Bypass} = 1 - [(1 - 0,951229) * (1 - 0,9999844)] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_{UPS//Bypass} = 0,999999239172$$

Sendo assim o diagrama de fiabilidade do sistema fica do seguinte modo:

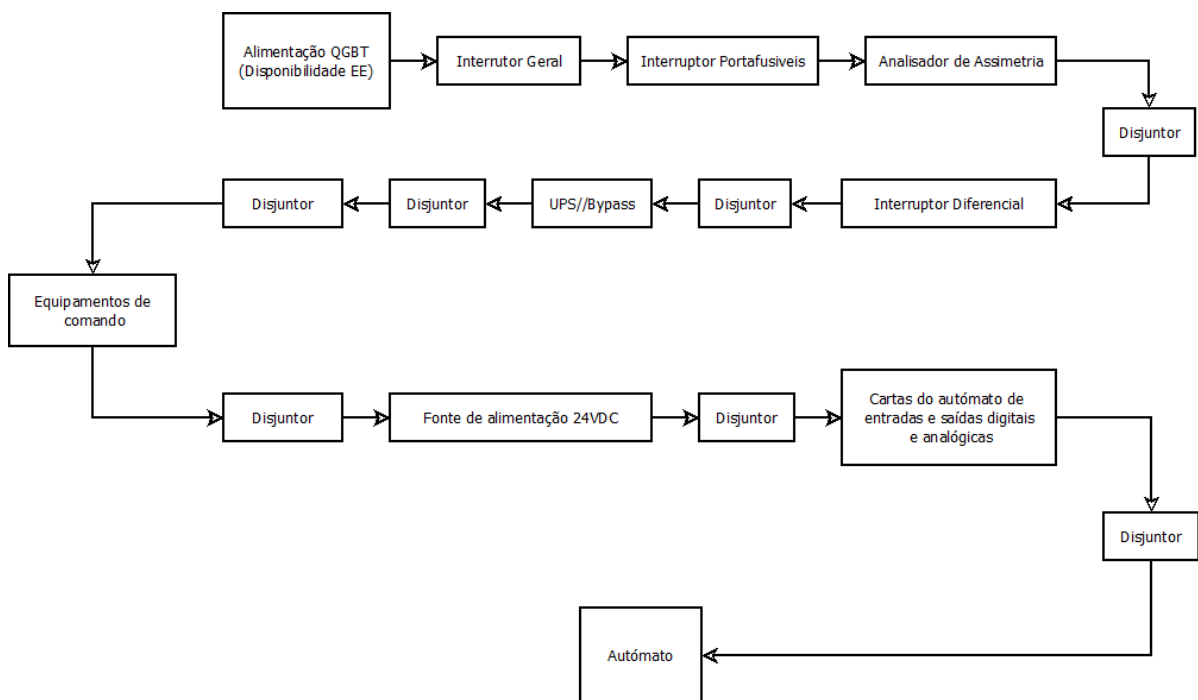


Figura 19 - Diagrama do circuito de comando simplificado

De igual forma pode-se simplificar:

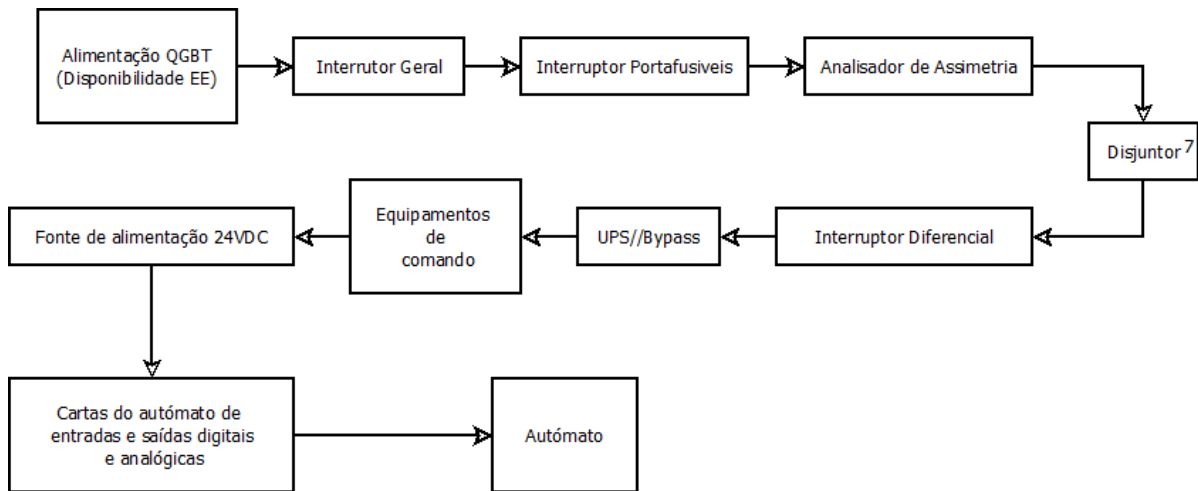


Figura 20 - Diagrama de circuito de comando simplificado

Atendendo que o interruptor geral tem a mesma taxa de falhas que o interruptor porta fusíveis, que o interruptor diferencial e que o disjuntor, estes podem se agrupar, tal como o autômato, as cartas do autômato e os equipamentos de comando tem a mesma taxa de falhas estes também se podem agrupar:

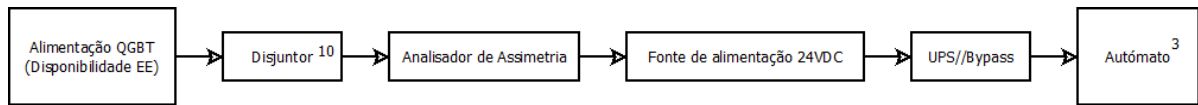


Figura 21 - Diagrama do circuito de comando simplificado

Como tal a fiabilidade do sistema resulta:

$$R_S = A_{Energia\ Eletrica} * R_{Disj}^{10} * R_{Anal.Assimetria} * R_{Automato}^3 * R_{Fonte\ Alimentação} * R_{UPS//Bypass}$$

$$\Leftrightarrow R_S = A_{Energia\ Eletrica} * R_{Circ.Comando}$$

$$R_{Circ.Comando} = R_{Disj}^{10} * R_{Anal.Assimetria} * R_{Automato}^3 * R_{Fonte\ Alimentação} * R_{UPS//Bypass} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_{Circ.Comando} = 0,997503^{10} * 0,99997 * 0,991701^3 * 0,970546 * 0,999999239172 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_{Circ.Comando} = 0,92318156423$$

$$R_S = A_{Energia\ Eletrica} * R_{Circ.Comando} \Leftrightarrow R_S = 0,992 * 0,92318156423 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_S = 0,915796111736$$

A Fiabilidade do sistema de comando é de aproximadamente 91,57%. Este valor é considerado baixo pois está notoriamente abaixo dos 95% que se considera o valor mínimo aceitável. Como tal devemos aumentar em termos de fiabilidade o nosso sistema incluindo redundância nos elementos mais críticos.

Olhando para o circuito de comando, o elemento mais crítico será a fonte de alimentação, como tal vamos colocar duas fontes em paralelo.

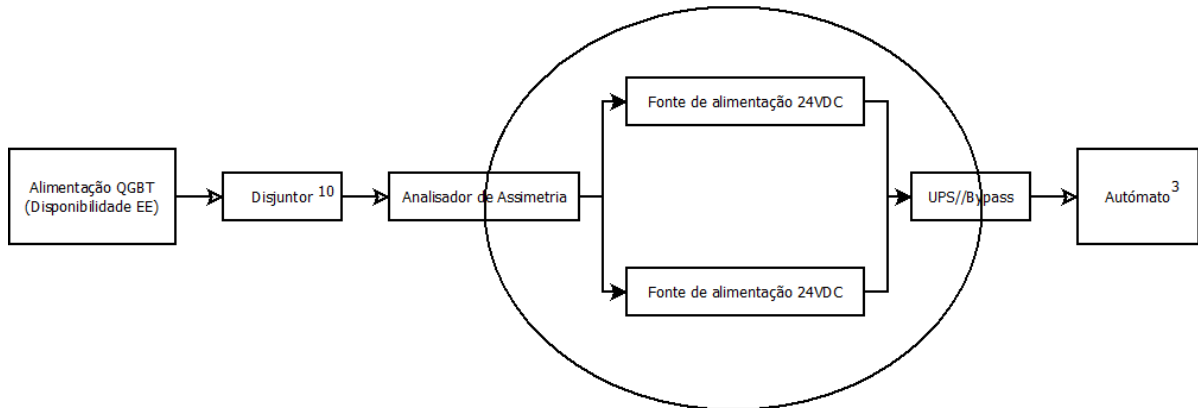


Figura 22 - Diagrama do circuito de comando simplificado com duas fontes de alimentação em paralelo

$$R_{Fontes\ Paralelo} = 1 - (1 - 0,970546) * (1 - 0,970546) = 0,999132461884$$

$$R_{Circ.Comando} = 0,950372954043$$

$$R_S = 0,942769970411$$

Mesmo assim a fiabilidade do sistema ainda está abaixo dos 95%. Neste momento para garantir um pequeno aumento de fiabilidade do sistema seria necessário criar redundâncias em equipamentos dispendiosos ou então proteções elétricas. Esta solução não será melhor pois os gastos para tal são muito elevados e os resultados baixíssimos.

## 6. Aplicação da Ferramenta de Cálculo

Neste capítulo vamos comprovar que a ferramenta para o mesmo exemplo permite chegar aos mesmos valores que foram obtidos teoricamente de um modo mais simples e expedito.

A ferramenta ao arrancar apresenta a seguinte página:



Figura 23 - Página inicial da ferramenta

Para o exemplo apresentado anteriormente foi criado então o sistema em questão.

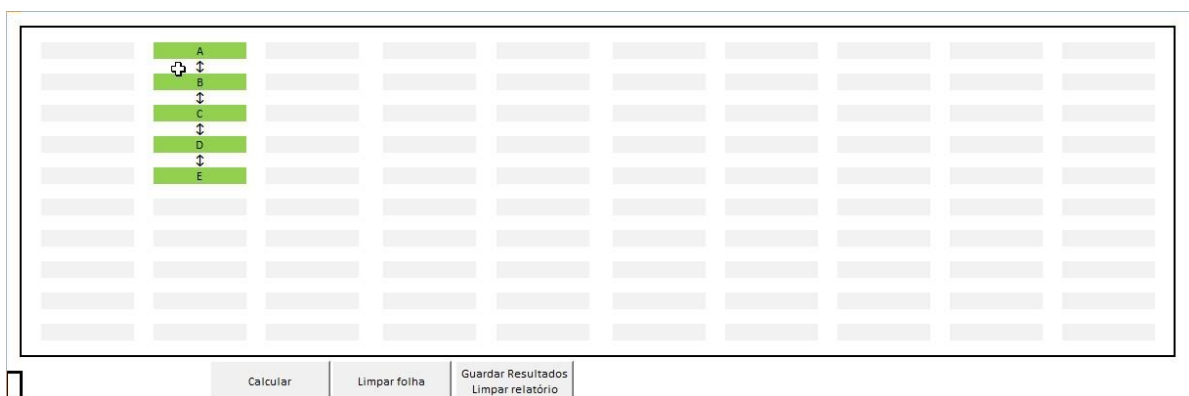


Figura 24 - Sistema criado na ferramenta

Em que:

Elemento "A" corresponde a Disjuntor<sup>10</sup>;

Elemento "B" corresponde a Analisador de Assimetria;

Elemento "C" corresponde a Fonte de Alimentação de 24VDC;

Elemento "D" corresponde a sistema em paralelo entre UPS e Bypass;

Elemento "E" corresponde ao Autómato<sup>3</sup>;

Visto não termos o valor de “D” (Sistema em paralelo entre UPS e Bypass), foi necessário calcular o mesmo. Para tal criou-se o seguinte sistema:



Figura 25 - Cálculo de sistema Ups//Bypass na Ferramenta

Em que o elemento “A” e o elemento “D” tem como taxa de falhas o valor de 0; Isto acontece porque é sempre necessário ter um elemento inicial e um elemento final;

O elemento “B” equivale á UPS e o elemento “C” equivale ao Bypass.

Visto não termos o valor da taxa de falhas de um relé foi necessário também calcular o mesmo.

Para tal criou-se o seguinte sistema:



Figura 26 - Cálculo da fiabilidade de um relé na ferramenta

Em que:

Elemento "A" corresponde á fiabilidade da Bobina;

Elemento "B" corresponde á fiabilidade da componente mecânica do relé;

Segundo o relatório o resultado é o seguinte para a fiabilidade de um relé.

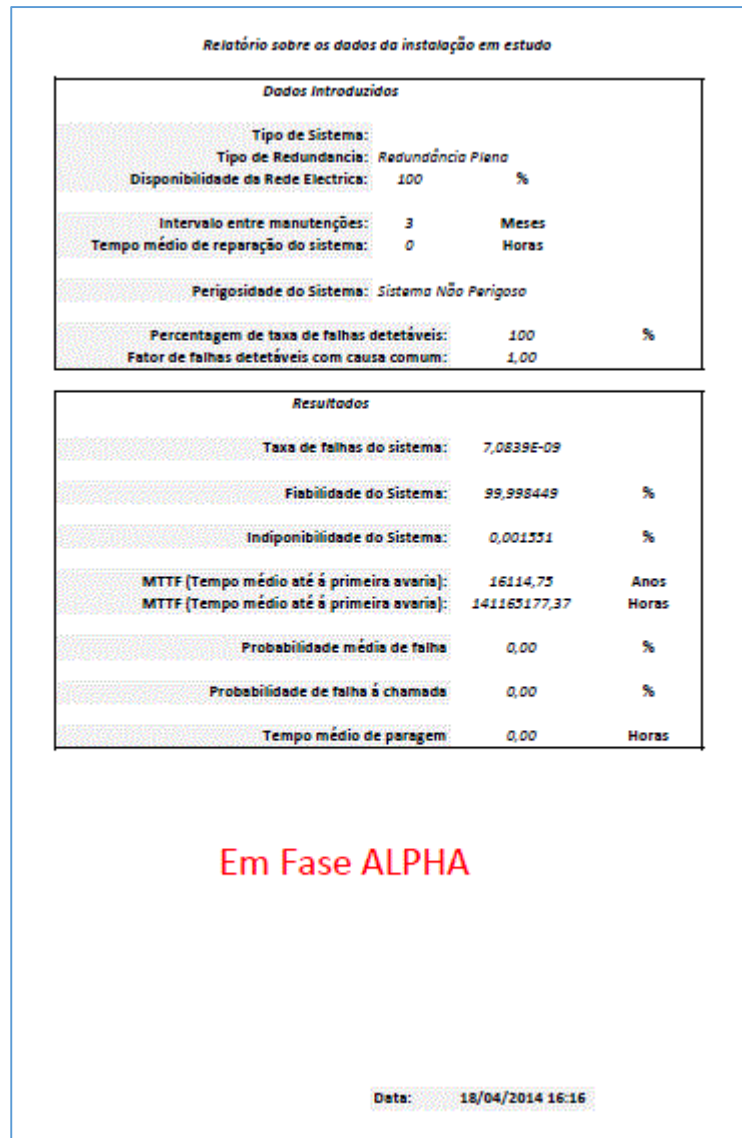


Figura 27 - Resultados do cálculo da fiabilidade de um relé

Conforme se pode verificar pelo relatório o resultado esta correto relativamente aos cálculos;

Após o cálculo do relé, foi realizado o cálculo do sistema de Bypass á UPS, tal como indicado anteriormente:

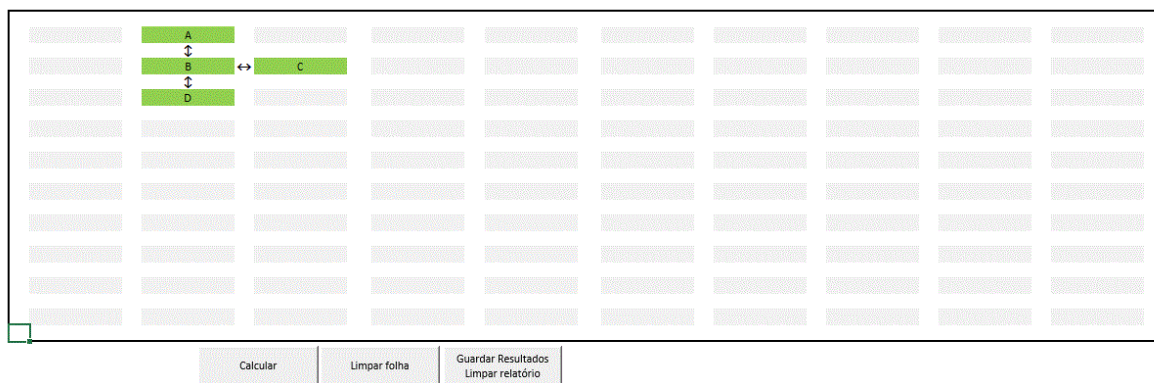


Figura 28 - Cálculo de sistema Ups//Bypass na Ferramenta

Após carregar na tecla para calcular, aparece a seguinte caixa:

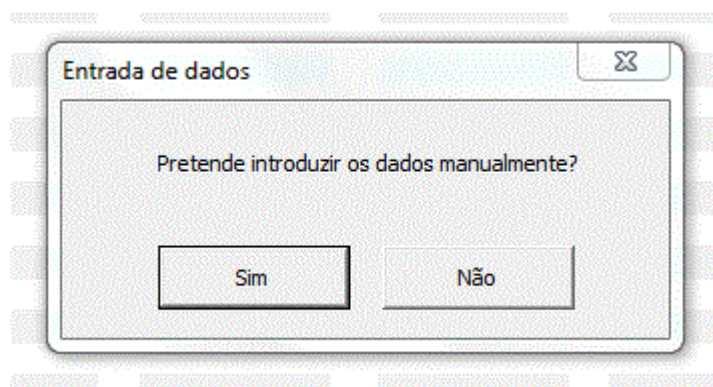


Figura 29 - Entrada de dados (manualmente ou base de dados)

Aqui é indicado se os dados para efetuar os cálculos serão introduzidos manualmente ou se já existem na base de dados. Visto que ainda não existem foi indicado que os dados seriam introduzidos manualmente.

De seguida a caixa a aparecer é a seguinte:

Figura 30 - Entrada de dados

Nesta é indicada a periodicidade da manutenção em meses, o tempo gasto em reparações em horas e a disponibilidade da rede elétrica;

De seguida são introduzidos os dados referentes aos elementos:

Introdução de valores referente ao primeiro elemento (elemento A)

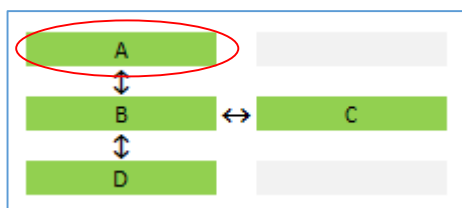


Figura 31 - Entrada de dados do 1º elemento

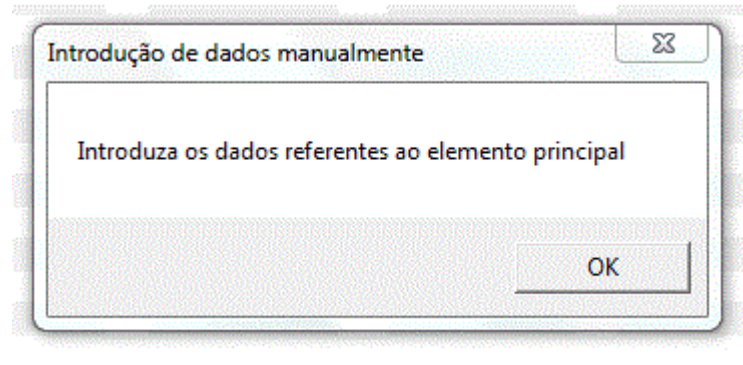


Figura 32 - Notificação para a entrada de dados do 1º elemento

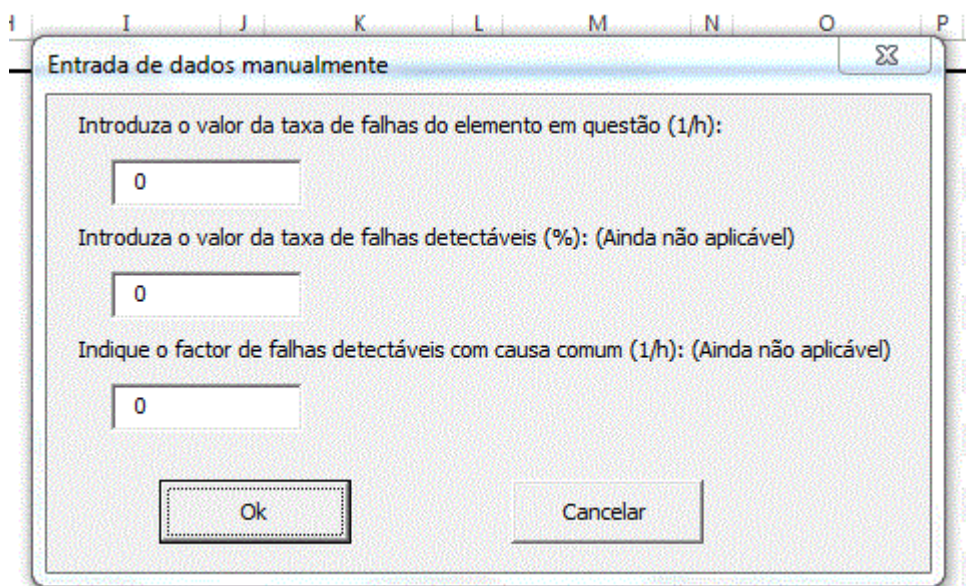


Figura 33 - Introdução de dados manualmente

Introdução de valores referente ao elemento final (elemento D)

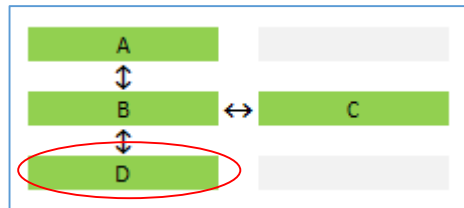


Figura 34 - Entrada de dados do último elemento

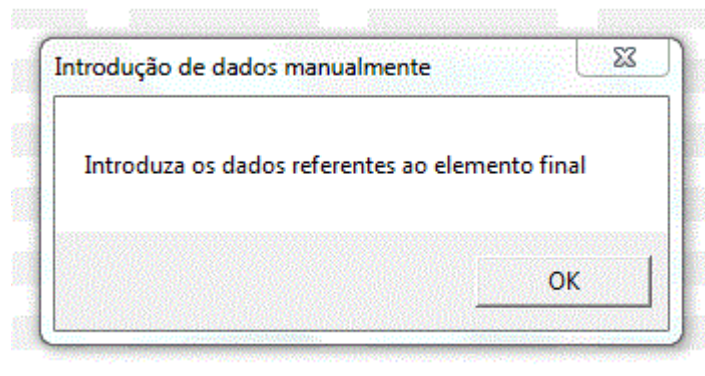


Figura 35- Notificação para a entrada de dados do último elemento

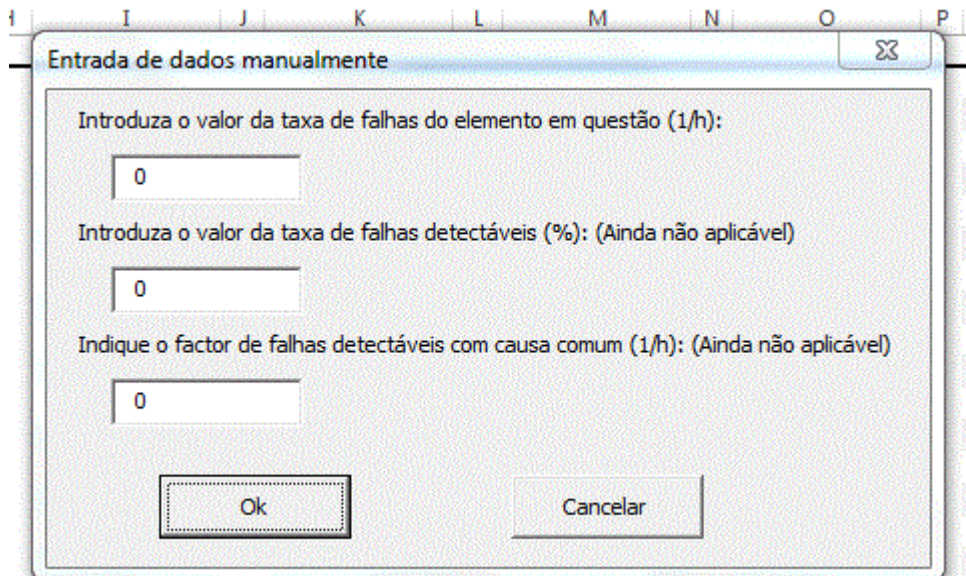


Figura 36 - Entrada de dados manualmente

Introdução de valores referente ao segundo elemento.

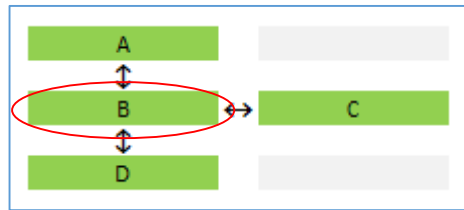


Figura 37 - Entrada de dados do 2º elemento

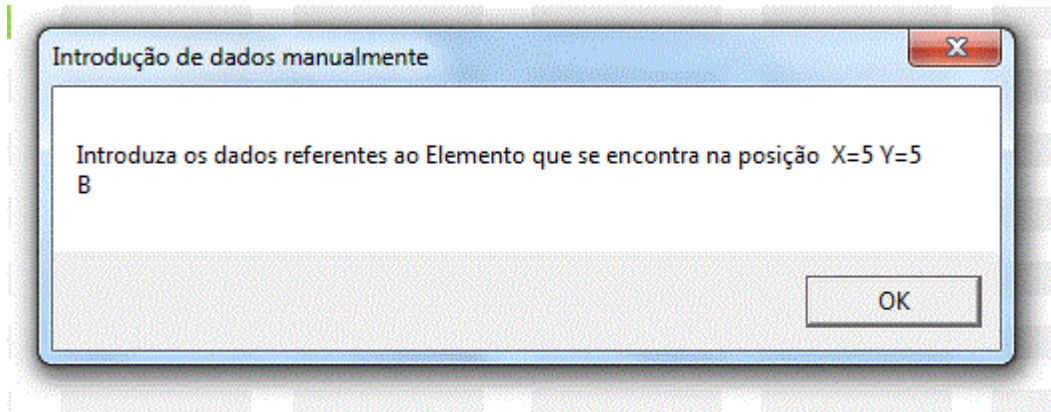


Figura 38 -Notificação de entrada de dados do 2º elemento

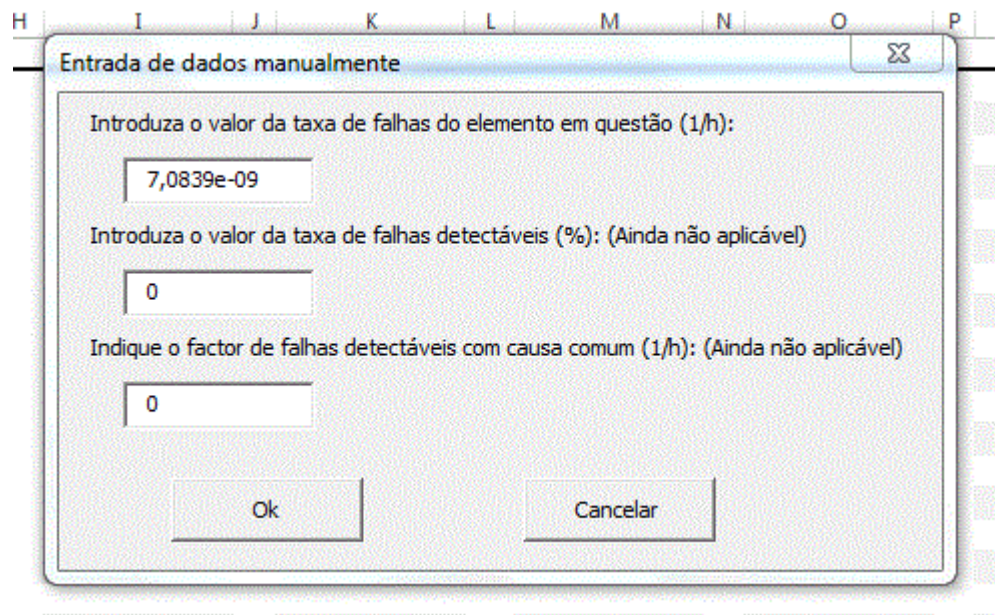


Figura 39 - Entrada de dados manualmente do 2º elemento

Introdução de valores referente ao terceiro elemento que se encontra em paralelo com o Elemento B (Elemento C).

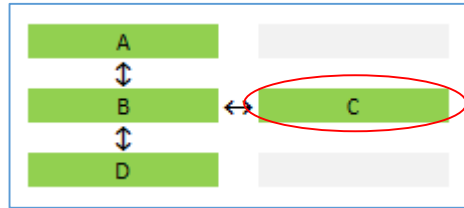


Figura 40 - Entrada de dados do 3º elemento

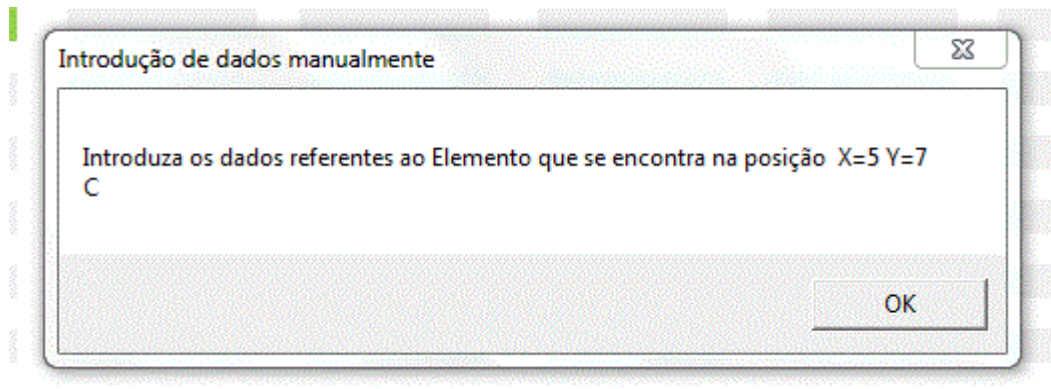


Figura 41 - Entrada de dados do 3º elemento

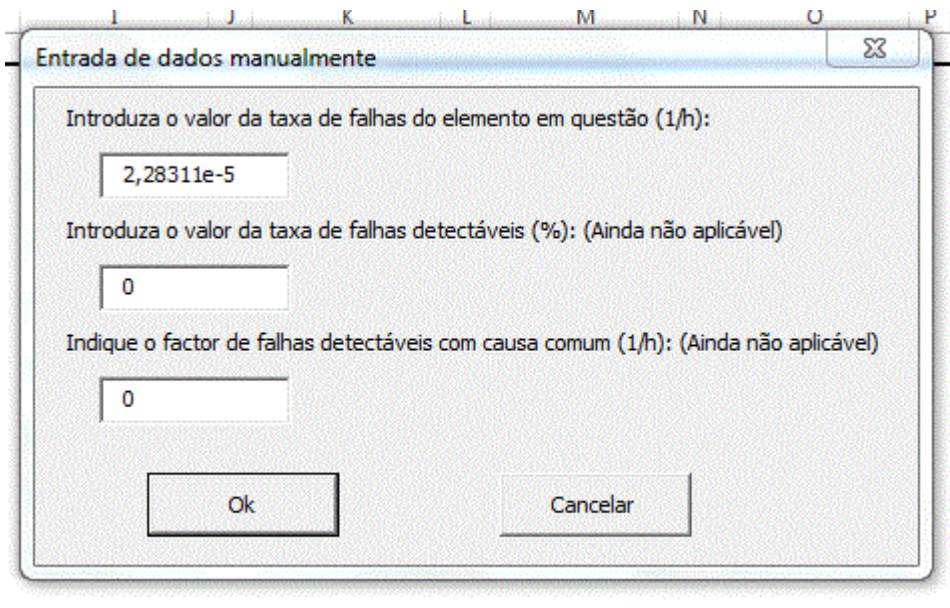


Figura 42 - Entrada de dados manualmente do 3º elemento

Segundo o relatório final o resultado está de acordo com os cálculos

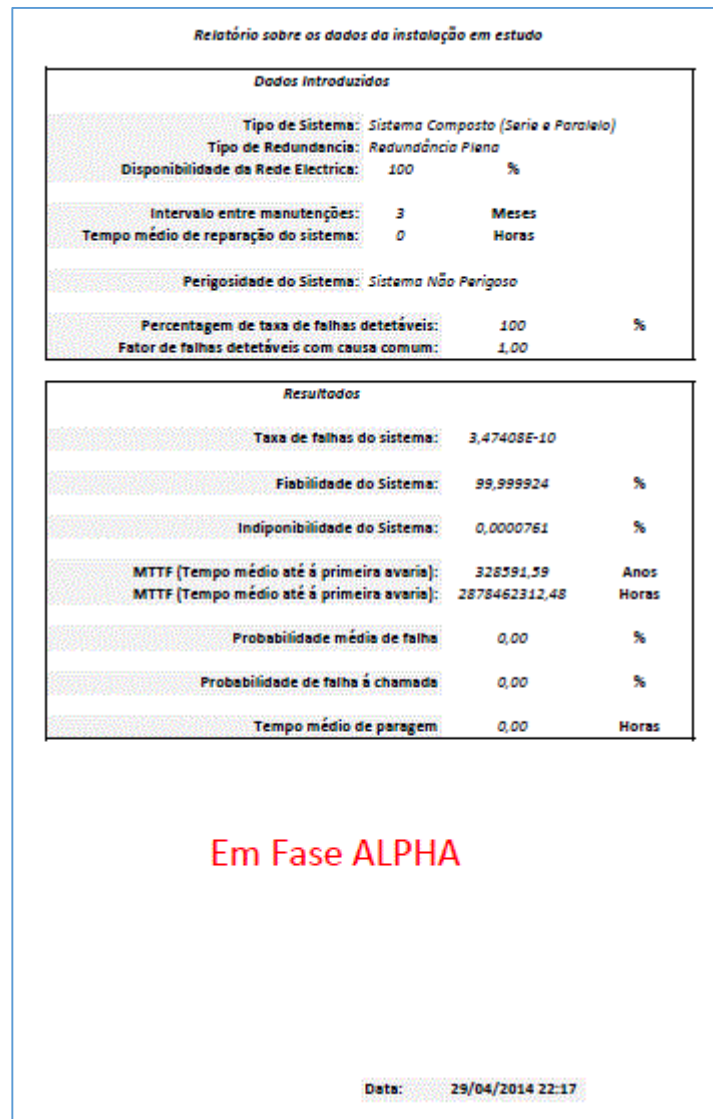


Figura 43 - Fiabilidade do sistema UPS//Bypass

De seguida com os dados referentes aos elementos restantes foi calculada a fiabilidade do sistema em si:

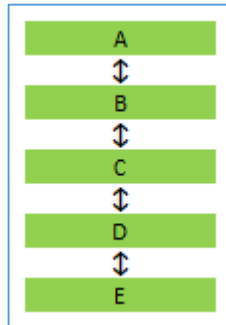


Figura 44 - Sistema em estudo

**Relatório sobre os dados da instalação em estudo**

Dados Introduzidos		
Tipo de Sistema:	Sistema Composto (Serie e Paralelo)	
Tipo de Redundancia:	Redundância Plena	
Disponibilidade da Rede Electrica:	99,2	%
Intervalo entre manutenções:	3	Meses
Tempo médio de reparação do sistema:	0	Horas
Perigosidade do Sistema:	Sistema Não Perigoso	
Percentagem de taxa de falhas detetáveis:	100	%
Fator de falhas detetáveis com causa comum:	1,00	

Resultados		
Taxa de falhas do sistema:	3,64963E-03	
Fiabilidade do Sistema:	91,379800	%
Indisponibilidade do Sistema:	8,4201995	%
MTTF (Tempo médio até à primeira avaria):	3,13	Anos
MTTF (Tempo médio até à primeira avaria):	27399,90	Horas
Probabilidade média de falha	4,66	%
Probabilidade de falha à chamada	0,00	%
Tempo médio de paragem	0,00	Horas

Em Fase ALPHA

Data: 30/04/2014 22:29

Figura 45 - Resultados do cálculo do sistema estudado

De seguida no sentido de aumentar a fiabilidade do sistema colocaram-se duas fontes em paralelo:

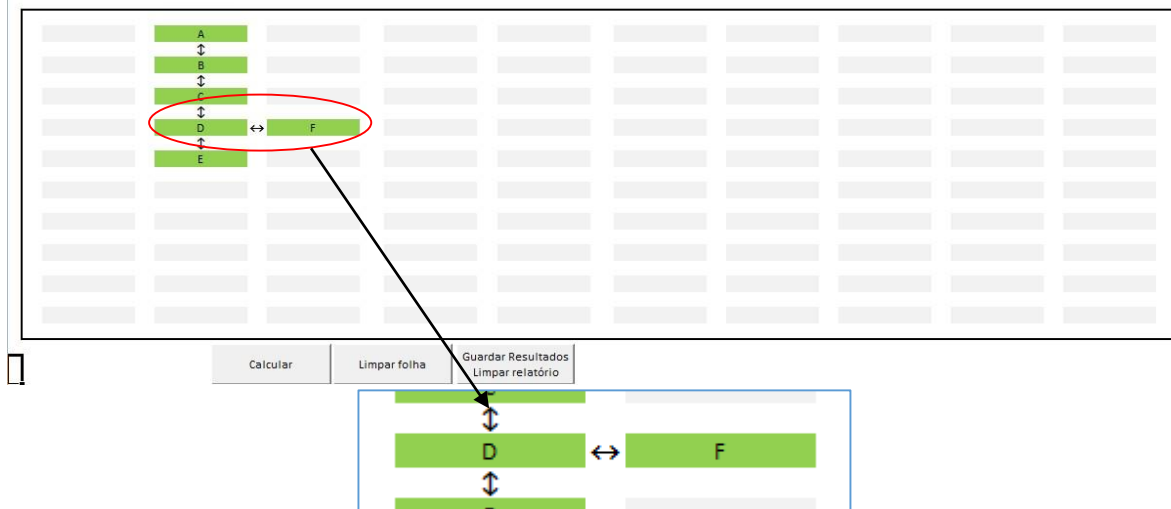


Figura 46 - Aumento de fiabilidade do sistema com a incursão de uma segunda fonte de alimentação.

**Relatório sobre os dados da instalação em estudo**

Dados introduzidos		
Tipo de Sistema:	Sistema Composto (Serie e Paralelo)	
Tipo de Redundancia:	Redundância Plena	
Disponibilidade da Rede Electrica:	99,2	%
Intervalo entre manutenções:	3	Meses
Tempo médio de reparação do sistema:	0	Horas
Perigosidade do Sistema:	Sistema Não Perigoso	
Percentagem de taxa de falhas detetáveis:	100	%
Fator de falhas detetáveis com causa comum:	1,00	

Resultados		
Taxa de falhas do sistema:	2,32416E-05	
Fiabilidade do Sistema:	94,277161	%
Indisponibilidade do Sistema:	5,7228393	%
MTTF (Tempo médio até à primeira avaria):	4,91	Anos
MTTF (Tempo médio até à primeira avaria):	43026,34	Horas
Probabilidade média de falhas	3,28	%
Probabilidade de falhas à chamada	0,00	%
Tempo médio de paragem	0,00	Horas

Em Fase ALPHA

Data: 12/05/2014 23:35

Figura 47 - Resultado final

Os cálculos anteriormente expostos foram realizados com a introdução manual dos dados (Taxas de falhas de cada elemento).

A ferramenta também permite, escolher os elementos que pretendemos de uma lista de elementos já existentes na base de dados. É possível e relativamente fácil ao utilizador introduzir nesta base de dados mais elementos que julgue adequados.

Por exemplo:

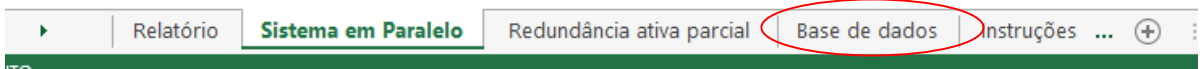
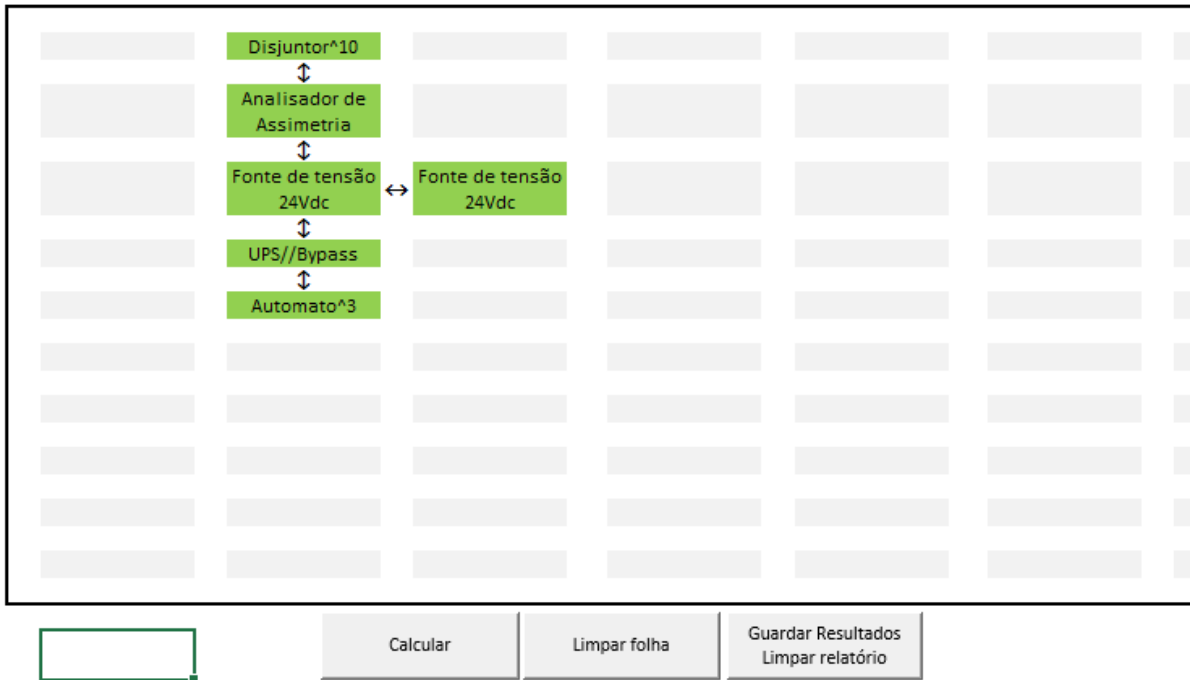


Figura 48 - Acesso á base de dados

Valores manuais		Valores padrão		
Elemento	Taxa de falha	Taxa de falha detectável	Fator de falhas detectáveis com causa comum	
Elemento A	Autómato	3,8051800E-06	0,300	0,300
Elemento B	Disjuntor	1,1415500E-06	0,400	0,400
Elemento C	Fonte de tensão 24Vdc	1,3651200E-05	0,500	0,500
Elemento D	Interruptor diferencial	1,1415500E-06	0,300	0,300
Elemento E	Interruptor geral	1,1415500E-06	0,600	0,600
Elemento F	Transformador de 230V/24V	1,7448600E-09	0,200	0,200
Elemento G	Transformador de 380V/230V	1,7448600E-09	0,600	0,600
Elemento H	UPS	2,2831100E-05	0,200	0,200
Elemento I	Analisador de Assimetria	1,3890000E-08	0,300	0,300
Elemento J	Consola HMI	2,8538800E-05	0,400	0,400
Elemento K	Computador	2,0000000E-04	0,200	0,200
Elemento L	Bobina AC	1,3890000E-10	0,400	0,400
Elemento M	Contato relé	6,9450000E-09	0,400	0,400
Elemento N				
Elemento O	Redundancia ativa parcial			
Elemento P	Disjuntor^10	1,1415500E-05	1,000	1,000
Elemento Q	Automato^3	1,1415540E-05	1,000	1,000
Elemento R	UPS//Bypass	3,4740800E-10	1,000	1,000
Elemento S	Relé	7,0839000E-09	1,000	1,000
Elemento T	...			
Elemento U	←	1,0000000E+00	1,000	1,000
Elemento V	→	1,0000000E+00	1,000	1,000

Figura 49 - Base de dados

Existindo os elementos que pretendemos na base de dados basta escolher de uma lista os mesmos.

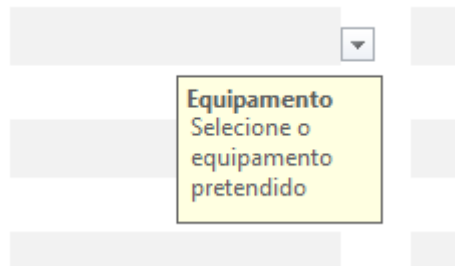


Figura 50 - Escolha do equipamento pretendido

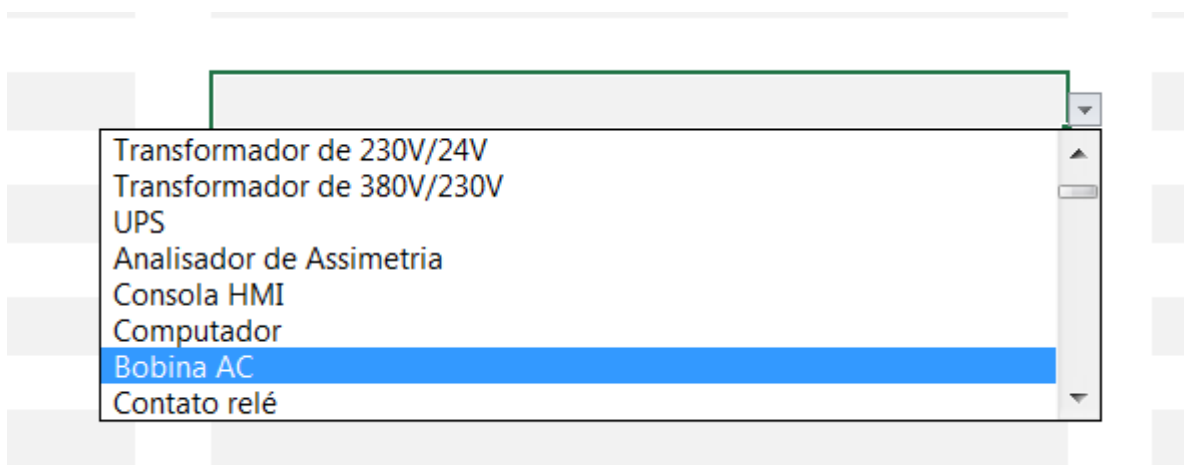


Figura 51 - Lista dos vários equipamentos da base de dados

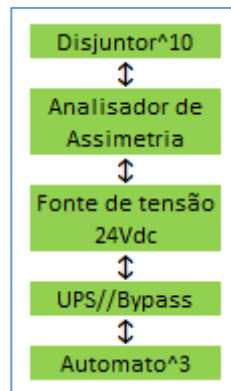


Figura 52 - Sistema estudado

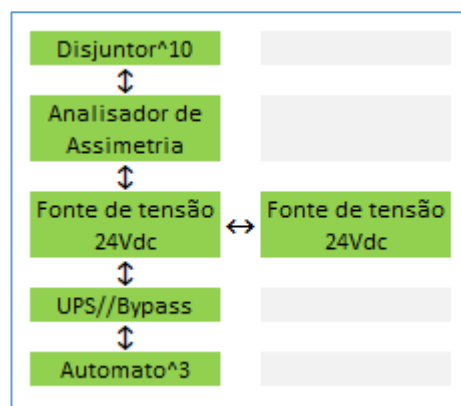


Figura 53 - Sistema estudado com a introdução de uma segunda fonte de alimentação

## 7. Resultados e Conclusões

O estudo da fiabilidade é importante e irá sê-lo sempre e cada vez mais. Através do estudo da fiabilidade de um sistema é possível melhorá-lo substancialmente e torna-lo economicamente mais aprazível atendendo que o estudo da fiabilidade tem como principal objetivo alongar os intervalos entre avarias/falhas bem como encurtar o tempo dessas mesmas avarias e falhas. O facto de se poder atuar em prevenção relativamente as avarias e falhas permite que se diminua os custos em manutenção preventiva e manutenção corretiva. Na manutenção preventiva tornando-a mais eficaz e resumindo às intervenções estritamente necessárias. Na manutenção corretiva, pois com uma manutenção preventiva eficaz, as avarias/falhas de maior importância serão minimizadas e as operações de manutenção relativas às de menor importância poderão ser agendadas para ocasiões mais convenientes.

No mundo da refrigeração industrial como em quase todas as áreas a ausência de avarias/falhas é importantíssima. Na refrigeração industrial uma avaria/falha em que o sistema fique comprometido, geralmente os custos são elevadíssimos pois para além dos custos inerentes á reparação do sistema existem também os custos associados às mercadorias que deveriam manter-se a temperaturas controladas. Na maioria dos casos esta mercadoria acaba por se estragar. Estes custos quase sempre superam em muito o custo da reparação da instalação, pondo muitas das vezes em causa a saúde financeira da empresa em questão. Como tal tornou-se cada vez mais importante a manutenção e por conseguinte o estudo da fiabilidade que é essencial ao seu planeamento eficiente.

A ferramenta em si ainda não se encontra esgotada quanto às suas funcionalidades e dificilmente a mesma estará totalmente concluída. O objetivo da mesma é proporcionar a todos aqueles que assim o pretendam, a simplificação no dia-a-dia, seja a nível profissional seja a nível académico, no âmbito do estudo de sistemas em termos de fiabilidade;

A mesma será sempre alvo de melhorias atendendo sempre as diversas opiniões e contribuições dos vários utilizadores;

Esta versão foi realizada usando uma ferramenta do Microsoft Office, o Excel, apenas no sentido de lançar a versão Alpha para o mercado e aferir da aceitação da mesma;

Atendendo á aceitação da ferramenta, poderemos então avançar para uma versão mais desenvolvida e suportada numa ferramenta de programação de modo a poder disponibilizar-se um executável de utilização mais direta;

A ferramenta será disponibilizada gratuitamente e aberta a todos os que queiram usufruir da mesma, pretendendo-se que caso algum utilizador queira implementar melhorias as possa realizar.

Os cálculos apresentados são meramente ilustrativos pretendendo apenas demonstrar a forma de utilização e as potencialidades da ferramenta em si.

## 8. Referências

- Alves, V. & Vilela, R. (2004). *Refrigeração Industrial por amónia: Riscos Segurança e Auditoria Fiscal*, Ministério do trabalho e Emprego, Secretaria de Inspeção do Trabalho, Departamento de segurança e saúde no Trabalho, Brasil.
- Barbosa, F. (2013). *Introdução á fiabilidade de sistemas elétricos de energia*, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Department of Defense Washington DC. (1980). *MIL-STD-1629A*, Military Standard Procedures for Performing a failure mode, effects and criticality analysis.
- Department of Defense Washington DC. (1991). *MIL-HDBK-217F Rev F*, Military Handbook Reliability prediction of Electronic Equipment
- Dreux, M. A. & Azevedo, F. G. (2009). *Macros para Excel na prática*, Elsevier - Campus
- Finder. (2013). *Série 40 - Relé para circuito impresso plug-in 8 - 10 - 16 A*, <http://gfinder.findernet.com//assets/Series/353/S40PT.pdf>
- Instruel. (n.d.). *Refrigeração*, <http://www.instruel.pt/pdf/refrigeracao.pdf>
- Lemos, B. (2010). *Análise RAMS na componente Manutenibilidade*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico
- McLinn, J. (2010). Issue of the reliability review. *The R & M Engineering Journal*
- Omron. (2011). *Scalable machine Solutions*, [http://downloads.industrial.omron.eu/IAB/Products/Motion%20and%20Drives/Frequency%20Inverters/General%20Purpose/JX/KPP\\_Scalable%20Machine%20Automation/ScalableMachineSolut\\_brochure\\_en\\_201105.pdf](http://downloads.industrial.omron.eu/IAB/Products/Motion%20and%20Drives/Frequency%20Inverters/General%20Purpose/JX/KPP_Scalable%20Machine%20Automation/ScalableMachineSolut_brochure_en_201105.pdf)
- Palma, j. & Cordeiro, A. (2009). *Introdução aos conceitos de fiabilidade, risco e segurança*, v05
- Schneider electric. (2009). *Altivar 21 (ST 02 129)*, <http://www.schneider-electric.com/download/hk/en/file/3009937-Altivar21-MTTF.pdf?fileName=Altivar21-MTTF.pdf&reference=Altivar-21---MTTF&docType=Declaration-of-conformity>
- Schneider electric. (n.d.). *DIT : Systémes de distribution terminale BT/LV protection devices & installation systems*, [http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER\\_ELECTRIC/content/live/FAQS/12000/FA12081/en\\_US/DOC%20of%20MTTF%20for%20MULTI9.pdf](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/12000/FA12081/en_US/DOC%20of%20MTTF%20for%20MULTI9.pdf)
- Schneider electric. (n.d.). *MTTF ATV71 IP20 & IP54 / ATV61 – IP20 & IP54*, [http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER\\_ELECTRIC/content/live/FAQS/11000/FA11798/en\\_US/MTTF\\_ATV71\\_ATV61.pdf](http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/11000/FA11798/en_US/MTTF_ATV71_ATV61.pdf)

- Schneider electric. (2011). *RM35TF30 multifunction phase control relay RM35-T – range 194..528 V AC*, <http://datasheet.octopart.com/RM35TF30-Schneider-Electric-datasheet-10673702.pdf>
- Serrano, M. (2010). Documento de apoio ao Curso de Formação sobre refrigeração industrial, Seabra Global
- Sew-Eurodrives. (2009). *Characteristic Safety Values for BE.. Brakes, 17063213/EN*, <http://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16828828.pdf>
- Sew-Eurodrives. (2010). *Safety Characteristics for BM(G) and BR Brakes, 17063213/EN* , <http://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/17063213.pdf>
- Siemens. (2009). *Easy Implementation of the European Machinery Directive*, <https://www.automation.siemens.com/cd-static/material/info/e20001-a230-m103-v2-7600.pdf>
- Siemens. (n.d.). *Reliability Consulting*, [https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/DE/DE00DEzAAAA\\_16818490\\_DL/reliability\\_e.pdf](https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/DE/DE00DEzAAAA_16818490_DL/reliability_e.pdf)
- Siemens. (n.d.). Values of MTBF, <https://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll/csfetch/16818490/mtbf.zip?func=cslib.csFetch&nodeid=46163536>
- Siemens. (2011). *Mean Time Between Failures (MTBF), 16818490*, [https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/Tc/TczMTUxMwAA\\_16818490\\_DL/mtbf\\_en.pdf](https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/Tc/TczMTUxMwAA_16818490_DL/mtbf_en.pdf)
- Silva, C. (2014). *Fluidos Refrigerantes*, Universidade federal do vale do são Francisco <http://www.univasf.edu.br/~castro.silva/disciplinas/REFRIG/REFRIGERANTES.pdf>
- Socomec. (2007). *Maintenance as a tool to increase the electric power availability, reduce running costs and prevent damage to people and property*, [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww\\_cmos.com.ar%2F%3Fwpfb\\_dl%3D52&ei=9STgU5C\\_KlqrQ0QXsuoDAAg&usg=AFQjCNHK90\\_cQnHrEdTTaBfmcxjavcQaFQ&sig2=L3DnCS1o4JqFaq-A-noacA&bvm=bv.72197243,d.d2k](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww_cmos.com.ar%2F%3Fwpfb_dl%3D52&ei=9STgU5C_KlqrQ0QXsuoDAAg&usg=AFQjCNHK90_cQnHrEdTTaBfmcxjavcQaFQ&sig2=L3DnCS1o4JqFaq-A-noacA&bvm=bv.72197243,d.d2k)
- Stoecker, W. (1998). *Industrial refrigeration Handbook*, Mc Graw Hill Education
- System Reliability Center. (2001). *Typical Equipment MTBF Values*, <https://src.alionscience.com/pdf/TypicalEquipmentMTBFValues.pdf>
- Torrell, W & Avelar, V., Schneider electric. (2011). *Mean Time between Failure: Explanation and standards*, white paper 78, Rev 1., [http://www.apcmedia.com/salestools/VAVR-5WGTSB/VAVR-5WGTSB\\_R1\\_EN.pdf](http://www.apcmedia.com/salestools/VAVR-5WGTSB/VAVR-5WGTSB_R1_EN.pdf)
- Walkenbach, J. (2004). *Excel VBA Programming for Dummies*, Wiley Publishing, Inc.

Weidmueller. (n.d.). *no risk more safety – ready for the new machinery directive*,  
[http://cmswebdav.weidmueller.de/cms/com\\_int/News/Win/Win\\_Special\\_SPS\\_2010/Machinery\\_Directive/Machinery\\_Directive\\_Part\\_1\\_EN.pdf](http://cmswebdav.weidmueller.de/cms/com_int/News/Win/Win_Special_SPS_2010/Machinery_Directive/Machinery_Directive_Part_1_EN.pdf)

## 9. Anexos

### 9.1. Programação em VBA

#### 9.1.1. Programa principal

```
' Declaração de variáveis
Public Nelementosparalelo As Integer ' Numero de colunas de elementos em paralelo
Public EPR, EPL As Integer ' Numero de colunas á esquerda e á direita em paralelo
Public Nconjuntosparalelo As Integer ' Numero de conjuntos de elementos em paralelo
Public EP, ES, EF As String ' EP - Elemento principal, ES - Elemento secundário, EF - Elemento final
Public E1X, E1X_F, E1Y As Integer ' Coordenadas X,Y do primeiro elemento da cadeia de equipamentos
Public E2X, E2Y As Integer ' Coordenadas X,Y do 2º elemento da cadeia de equipamentos
Public EFX, EFX_F, EFY As Integer ' Coordenadas X,Y do ultimo elemento da cadeia de equipamentos
Public LSX, LIX, LSY, LIY As Integer ' Limites superiores e inferiores do diagrama dos equipamentos
.....
Public EP_F, ES_F, EF_F As Double ' EP_F - Elemento principal_Fiabilidade, ES_F - Elemento secundário_Fiabilidade, EF_F - Elemento final_Fiabilidade
Public MyArrayinicioefimdeparalelos(1 To 1, 1 To 14) As Double ' Inicio e fim de grupos de elementos em paralelo
.....
Public Escolha As Boolean ' Entrada de dados pelo utilizador ou não
Public MyArrayTfalha(1 To 25, 1 To 25) As Double ' Entrada de dados pelo utilizador 1 to 12 1 to 10
Public MyArrayTfalha_detetavel(1 To 12, 1 To 10) As Double ' Entrada de dados pelo utilizador
Public MyArrayFdetetavel(1 To 12, 1 To 10) As Double ' Entrada de dados pelo utilizador
Public DadomanualTfalha As Double ' Entrada de dados pelo utilizador auxiliar
Public DadomanualTfalha_detetavel As Double ' Entrada de dados pelo utilizador auxiliar
Public DadomanualFfalha_detetavel As Double ' Entradada de dados pelo utilizador auxiliar
.....
'Public EPR, EPL As Integer ' Nº de elementos á direita e á esquerda em paralelo
.....
'Public SistemaSerie As Boolean ' Indicação de se o sistema está em Serie ou em Paralelo

'''VARIABLES PARA OS CÁLCULOS A SER EFECTUADOS'''
Public e As Double 'Constante de neper
Public If ' Taxa de falhas total do sistema
Public Ifp ' Taxa de falhas parcial
Public MTTfhoras, MTTfanos ' Tempo mérido até a falha
Public MTBFhoras ' Tempo médio entre paragens
Public MTTRhoras ' Tempo médio de reparações
Public Qt ' Infiabilidade do Sistema
Public Rt As Double ' Fiabilidade do sistema
Public Rtp As Double ' Fiabilidade do sistema com redundância parcial
Public A ' Disponibilidade
Public U ' Indisponibilidade
Public Tempo ' Tempo efectivo entre manutenções
```

```

Public Temporeparacoes ' Tempo efectivo entre manutenções e reparações
Public DisponibilidadeEnergia ' Disponibilidade de energia eléctrica
Public Ano As Integer ' N° de dias de um ano (365)
Public Dia As Integer ' N° de horas de um dia (24)
Public Mes As Integer ' N° de horas de um Mês (730)
Public MDT ' Tempo médio de paragem do elemento (h)
Public PFDmed ' Probabilidade média de falha á chamada do elemento
Public PFD ' Probabilidade de falha
Public Sistemaperigoso ' Indicação se o sistema é perigoso ou não
Public RedundanciaValue ' Indicação do tipo de redundância
Public L_D, Tf_D ' Taxa de Falhas detetáveis
Public L_U, Tf_U ' Taxa de Falhas não detetáveis
Public B_D ' Factor de falhas detectáveis com causa comum
Public B_U ' Factor de falhas indetectáveis com causa comum
Public Nelementosavariados ' N° de elementos que podem falhar num sistema com redundância Parcial
Public kpar ' N° de elementos ou ramos que podem falhar num sistema com redundancia parcial
.....
Public Excel PDF As Integer

```

---

```

Sub Programaprincipal() ' Programa Principal

    Call Inicializarvariaveis 'M1
    Call Ultimalinharealmenteocupada 'M2
    Call Validarelementoprincipal 'M3
    Call Validarelementofinal 'M3
    Call Elementoinicialesecundario 'M5
    Call ElementoParalelo 'M6
    Call Leituradevalores 'M4
    ' Call Entradadedados 'M7
    Call Apresentaçoresultados 'M9

End Sub

```

### 9.1.2. Inicializar variáveis

```
Sub Inicializarvariaveis() ' Inicialização de Variáveis
Nelementoinicial = 0
EP = 0
ES = 0
EF = 0
EP_F = 0
ES_F = 0
EF_F = 0
E1X = 0
E1X_F = 0
E1Y = 0
EFX = 0
EFX_F = 0
EFY = 0
LSX = 3
LIX = 21
LSY = 3
LIY = 21
Rt = 0
Ano = 365
Dia = 24
Mes = 730
RedundanciaValue = 2 ' Redundancia ativa plena
Tf = 0
MTTFhoras = 0
MTTFanos = 0
Rt = 0
Qt = 0
'Taxa de falhas detetáveis e indetetáveis
L_D = 1
L_U = 0
'Factor de falhas detetáveis e indetetáveis com causa comum
B_D = 1
B_U = 0
'Constante de neper
e = 2.7182818285
End Sub
```

### 9.1.3. Última linha ocupada

```
' Rotinas para verificar qual a ultima linha e coluna utilizadas e assim definir o ultimo elemento
Sub Ultimainharealmenteocupada()
  ActiveCell.SpecialCells(xlLastCell).Select
  LastR = ActiveCell.Row
  LastC = ActiveCell.Column
  LastRealC = 1
  For Counter = LastR To 1 Step -1
    Range(Cells(Counter, LastC), Cells(Counter, LastC)).Select
    Selection.End(xlToLeft).Select
    If Not IsEmpty(ActiveCell.Value) Then
      LastRealR = ActiveCell.Row
      Exit For
    End If
  Next
  EFX = LastRealR
  Call Ultimoelemento
  'Call Ultimacolunarealmenteocupada
End Sub
Sub Ultimoelemento()
  Dim y, z, n As Integer ' Variáveis auxiliares
  z = 0
  n = 0 ' Numero de elementos do sistema
  y = 1
  n = Application.WorksheetFunction.CountA(Worksheets("Sistema em Paralelo").Range("C3:U21"))
  If n <> 0 Then
    Do Until Cells(EFX, y) <> ""
      EFY = y + 1
      EF = Cells(EFX, EFY)
      y = y + 1
    Loop
  Else: End If
End Sub
```

### 9.1.4. Guardar como

```

Sub GuardarDados()
GuardarComouserform.Show
Call RelatorioEXCEL_PDF
End Sub

Sub RelatorioEXCEL_PDF()
Dim wkbSource As Workbook
Dim wkbDest As Workbook
Dim shtToCopy As Worksheet
Dim Data As String
Dim Time As String
If Excel_PDF = 1 Then
Set wkbSource = ActiveWorkbook
Set newBook = Workbooks.Add(xlWBATWorksheet)
Set wkbDest = ActiveWorkbook
Set shtToCopy = wkbSource.Sheets("Relatório")
shtToCopy.Copy wkbDest.Sheets(1)
Data = VBA.Format(VBA.Date, "dd-mm-yyyy")
Time = VBA.Format(VBA.Time, "hh-mm-ss")
Do
fName = Application.GetSaveAsFilename(InitialFileName:="Relatório")
Loop Until fName <> False
fName = Left(fName, Len(fName) - 1) ' Não deixa colocar dois pontos na extensão
'Imprimir em excel
newBook.SaveAs Filename:=fName & "_" & Data & "_" & Time & ".xlsx" ', FileFormat:=xlOpenXMLWorkbookMacroEnabled
ElseIf Excel_PDF = 2 Then
Data = VBA.Format(VBA.Date, "dd-mm-yyyy")
Time = VBA.Format(VBA.Time, "hh-mm-ss")
Do
fName = Application.GetSaveAsFilename(InitialFileName:="Relatório")
Loop Until fName <> False
fName = Left(fName, Len(fName) - 1) ' Não deixa colocar dois pontos na extensão
'Imprimir em PDF
Sheets("Relatório").Select
ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, Filename:=fName & "_" & Data & "_" & Time, Quality:=xlQualityStandard, IncludeDocProperties:=Tr
Sheets("Sistema em Paralelo").Select
ElseIf Excel_PDF = 3 Then
' Apagar o relatório. Atenção esta deve ser a ultima tarefa do programa
Sheets("Relatório").Select
Range("F6").Select

```

```
Selection.ClearContents
Range("F7").Select
Selection.ClearContents
Range("F8").Select
Selection.ClearContents
Range("F10").Select
Selection.ClearContents
Range("F11").Select
Selection.ClearContents
Range("F13").Select
Selection.ClearContents
Range("G15").Select
Selection.ClearContents
Range("G16").Select
Selection.ClearContents
Range("G20").Select
Selection.ClearContents
Range("G22").Select
Selection.ClearContents
Range("G24").Select
Selection.ClearContents
Range("G26").Select
Selection.ClearContents
Range("G27").Select
Selection.ClearContents
Range("G29").Select
Selection.ClearContents
Range("G31").Select
Selection.ClearContents
Range("G33").Select
Selection.ClearContents
Sheets("Sistema em Paralelo").Select
End If
End Sub
```

### 9.1.5. Validar elementos

```

Sub Validarelementoprincipal() ' Assegurar que existe apenas um elemento inicial
Dim Nelementoinicial As Integer ' N° de elementos selecionados como elemento inicial
Nelementoinicial = Application.WorksheetFunction.CountA(Worksheets("Sistema em Paralelo").Range("C3:U3"))
    If Nelementoinicial > "1" Then
        MsgBox "Apenas podes escolher um elemento principal", vbCritical
    End
    ElseIf Nelementoinicial = "0" Then
        MsgBox "Deves indicar o elemento principal", vbCritical
    End
End If
End Sub

```

---

```

Sub Validarelementofinal() ' Assegurar que existe apenas um elemento final
Dim Nelementofinal As Integer ' N° de elementos selecionados como elemento final
Nelementofinal = Application.WorksheetFunction.CountA(Worksheets("Sistema em Paralelo").Range(Cells(EFX, LSX), Cells(EFX, LIX)))
    If Nelementofinal > 1 Then
        MsgBox "Apenas podes escolher um elemento final", vbCritical
    End
    ElseIf Nelementofinal = 0 Then
        MsgBox "Deves indicar o elemento final", vbCritical
    End
    ElseIf EFX < 5 Then
        MsgBox " O sistema deve ser composto por dois elementos no minimo", vbCritical
    End
End If
End Sub

```

### 9.1.6. Leitura de valores

```

Sub Leituradevalores() ' Leitura de Valores
Dim x, y, k, w, z As Integer
VS2DadosManuaisUserForm.Show
Entradadedadosuserform.Show
If Escolha = True Then 'Entrada de dados pelo utilizador
' Dados referentes ao elemento inicial
MsgBox " Introduza os dados referentes ao elemento principal ", , "Introdução de dados manualmente"
    Entradadadosmanualmenteuserform.Show
    MyArrayTfalha(1, 1) = DadomanualTfalha
    MyArrayTfalha_detetavel(1, 1) = DadomanualTfalha_detetavel
    MyArrayFdetetavel(1, 1) = DadomanualFfalha_detetavel
' Dados referentes ao elemento final
MsgBox " Introduza os dados referentes ao elemento final ", , "Introdução de dados manualmente"
    Entradadadosmanualmenteuserform.Show
    MyArrayTfalha(1, 2) = DadomanualTfalha
    MyArrayTfalha_detetavel(1, 2) = DadomanualTfalha_detetavel
    MyArrayFdetetavel(1, 2) = DadomanualFfalha_detetavel
' Dados referentes aos elementos restantes
w = 3 'desde 5 até 21 de 2 em 2
z = 1 'letra c(3)até u(21) de 2 2m 2
Cells(w, z).Select
k = Application.WorksheetFunction.CountA(Worksheets("Sistema em Paralelo").Range("C3:U21"))
    If k > 3 Then
        For x = 2 To 12
            w = w + 2
            If w < EFX Then
                For y = 1 To 10
                    z = z + 2
                    If Cells(w, z).Value <> "" Then
                        If Cells(w, z).Value = "Redundancia ativa parcial" Then
                            Call Calculoparcialintroducao
                            MyArrayTfalha(w, z) = Ifp
                            'MyArrayTfalha_detetavel(x, y) =
                            'MyArrayFdetetavel(x, y) =
                        End If
                        If Cells(w, z).Value <> "Redundancia ativa parcial" Then
                            MsgBox "Introduza os dados referentes ao Elemento que se encontra na posição " & " " & "X=" & w & " " & "Y=" & z
                                & vbCrLf & Cells(w, z).Value, , "Introdução de dados manualmente"
                            Entradadadosmanualmenteuserform.Show
                        End If
                    End If
                Next y
            Next w
        Next x
    End If
End Sub

```

```

MyArrayTfalha(w, z) = DadomanualTfalha ' (x,y) depois tenho de ver o que se passa
MyArrayTfalha detetavel(x, y) = DadomanualTfalha detetavel
MyArrayFdetetavel(x, y) = DadomanualFfalha_detetavel
End If
    End If
    Next
    End If
    z = 1
Next
w = 3
End If
End If
If Escolha = False Then ' Valores padrão
    If Nelementosparalelo < 1 Then
        MsgBox "Este é um sistema com elementos apenas em serie!", , "SISTEMA SERIE"
        'Entradadedadosuserform.Show
        If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
            Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
        ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
            Sistemanaoperigosouserform.Show
        End If
        Call Calculoelementosserie ' Módulo dos cálculos
    ElseIf Nelementosparalelo > 1 Or Nconjuntosparalelo > 1 Then
        MsgBox "Este é um sistema com elementos em serie e em paralelo!", , "SISTEMA COMPOSTO" ' APAGAR DPS
        'Entradadedadosuserform.Show
        'Tiporedundanciauserform.Show
        'Call Redundancia
        If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
            Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
        ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
            Sistemanaoperigosouserform.Show
        End If
        Call Calculoelementosparalelo ' Módulos dos cálculos
    End If
ElseIf Escolha = True Then 'Entrada de dados manualmente
    If Nelementosparalelo < 1 Then
        MsgBox "Este é um sistema com elementos apenas em serie!", , "SISTEMA SERIE" ' APAGAR DPS
    
```

```

'Entradadedadosuserform.Show
'Sistema perigoso = 1
If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
'Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
'Sistemaoperigosouserform.Show
End If
Call CalculoelementosserieII ' Módulo dos cálculos
ElseIf Nelementosparalelo > 1 Or Nconjuntosparalelo > 1 Then
MsgBox "Este é um sistema com elementos em serie e em paralelo!", , "SISTEMA COMPOSTO" ' APAGAR DPS
'Entradadedadosuserform.Show
'Tiporedundanciauserform.Show
'Call Redundancia
If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
'Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
'Sistemaoperigosouserform.Show
End If
Call CalculoelementosparaleloII ' Módulos dos cálculos
End If
End If
End Sub
Sub Calculoparcialintroducao()
Sheets("Redundância ativa parcial").Select
MsgBox "Estruture o sistema para elementos com redundância activa parcial." & vbCrLf & "" & vbCrLf & "Nota:" & vbCrLf & "Este tipo de redundância i
MsgBox "Os elementos com fundo laranja são os elementos" & vbCrLf & "para os quais pretendede implementar redundancia ativa parcial!" & vbCrLf & ""
Call Calculoparcial
Sheets("Sistema em Paralelo").Select
End Sub

Sub Calculoparcial()
Dim xpar, Ypar, wpar, zpar As Integer
Dim S1, S2, S3, S4
Dim MyArrayIfalhaparcial(1 To 20, 1 To 20) As Double ' Entrada de dados pelo utilizador 1 to 12 1 to 10
Dim MyArrayIfalha_detetavelparcial(1 To 12, 1 To 10) As Double ' Entrada de dados pelo utilizador
Dim MyArrayFdetetavelparcial(1 To 12, 1 To 10) As Double ' Entrada de dados pelo utilizador
Dim Rtps, Rtps_100

```

```

Dim N_K
Dim N_Kfat, Kparfat, Nelementosavariadosfat As Integer
Dim xis
'Constante de neper
e = 2.7182818285
Mes = 730
'Tempo = 1
'DisponibilidadeEnergia = 100
Sheets("Redundância ativa parcial").Select
  For xpar = 3 To 11
    If Cells(xpar, 3) <> "" Then
      MsgBox "Introduza os dados referentes ao Elemento que se encontra na posição " & " " & "X=" & xpar & " " & "Y=" & 3 | vbCrLf & Cells(xpa
      Entradadadosmanualmenteuserform.Show
      MyArrayTfalhaparcial(xpar, 3) = DadomanualTfalha ' (x,y) depois tenho de ver o que se passa
      MyArrayTfalha_detetavelparcial(xpar, 3) = DadomanualTfalha_detetavel
      MyArrayFdetetavelparcial(xpar, 3) = DadomanualFfalha_detetavel
    End If
    xpar = xpar + 1
  Next
  kpar = Application.WorksheetFunction.CountA(Worksheets("Redundância ativa parcial").Range("C3:C9")) ' N° de ramos ou elementos em paralelo (n)
teste:
  Nelementosfalhauserform.Show ' Nelementosavariados - Numero de elementos ou ramos que podem avariar (k)
  If Nelementosavariados > kpar Then
    MsgBox (" O numero de elementos que podem falhar deve ser inferior ao numero de elementos do sistema")
    GoTo teste
  End If
  For xpar = 3 To 11
    TFps = TFps + MyArrayTfalhaparcial(xpar, 3) ' Taxa de falhas do elemento ou ramo
  Next
  xpar = xpar + 1
  .....
  Rtps = ((Exp(-TFps * Tempo * Mes)) * (DisponibilidadeEnergia / 100)) * (DisponibilidadeEnergia / 100) ' Fiabilidade do ramo ou elemento em estudo (R)
  Rtps_100 = Rtps * 100
  .....
  N_K = kpar - Nelementosavariados
  .....
  Kparfat = 1
  If kpar > 0 Then 'Lembrando que 0! = 1.
    For xis = 1 To kpar

```

```

        Kparfat = Kparfat * xis
    Next xis
End If
.....
Nelementosavariadosfat = 1
If Nelementosavariados > 0 Then 'Lembrando que 0! = 1.
    For xis = 1 To Nelementosavariados
        Nelementosavariadosfat = Nelementosavariadosfat * xis
    Next xis
End If
.....
N_Kfat = 1
If N_K > 0 Then 'Lembrando que 0! = 1.
    For xis = 1 To N_K
        N_Kfat = N_Kfat * xis
    Next xis
End If
.....
'n=kpar
'k=nelementosavariados
'R=Rtps
'r=n-k
'Rs=[R^n] + [n.R^(n-1)*(1-R)] + [(n*(n-1))/(2!)] .R^(n-2) .(1-R)^2]+ ... + [(n!)/(k! .(n-k)!)] .R^(n-k) .(1-R)^k]
.....
If Nelementosavariados = 0 Then
    Rtp = 100 * (Rtps ^ kpar)
End If
If Nelementosavariados = 1 Then
    Rtp = 100 * ((Rtps ^ kpar) + (kpar * (Rtps ^ (kpar - 1)) * (1 - Rtps)))
End If
If Nelementosavariados = 2 Then
    Rtp = 100 * ((Rtps ^ kpar) + (kpar * (Rtps ^ (kpar - 1)) * (1 - Rtps)) + (((kpar * (kpar - 1)) / (2)) * (Rtps ^ (kpar - 2)) * ((1 - Rtps) ^ 2)))
End If
If Nelementosavariados = 3 Then
    Rtp = 100 * ((Rtps ^ kpar) + (kpar * (Rtps ^ (kpar - 1)) * (1 - Rtps)) + (((kpar * (kpar - 1)) / (2)) * (Rtps ^ (kpar - 2)) * ((1 - Rtps) ^ 2))
End If
If Rtp = 100 Then Tfp = 0
If Rtp < 100 Then Tfp = -(((Log(Rtp / 100) / Log(e)) / (Tempo * Mes)))
Sheets("Redundância ativa parcial").Range("M5") = Rtp ' Fiabilidade do sistema dos elementos com redundância parcial
Sheets("Redundância ativa parcial").Range("M6") = Tfp ' Taxa de falha dos elementos com redundância parcial
Sheets("Redundância ativa parcial").Range("C13") = Rtps_100 ' Fiabilidade do ramo
End Sub

```

### 9.1.7. Elemento inicial e secundário

```
Sub Elementoinicialesecundario() ' Guardar o valor do elemento principal e do secundário
Dim x, y As Integer
' Determinação do 1º elemento
x = 3 'desde 3 até 21 de 2 em 2
y = 3 'letra c(3)até u(21) de 2 2m 2
Cells(x, y).Select
    Do While Cells(x, y).Value = ""
        y = y + 2
    Loop
    E1X = x
    E1Y = y
EP = Cells(E1X, E1Y)
' Determinação do 2º elemento
    E2X = x + 2
    E2Y = E1Y
ES = Cells(E2X, E2Y)
'MsgBox "O elemento Inicial é " & EP & vbCrLf & "O elemento secundário é " & ES & vbCrLf & "O elemento final é " & EF, , "Elementos inicial, secundário
End Sub
```

### 9.1.8. Elementos em paralelo

```

Sub ElementoParalelo() ' Definir quantas colunas de elementos em paralelo
Dim x, y As Integer
Dim A, B As Integer
Dim Xaux, Yaux1, Yaux2, XPS, YPS, E2XP, E2YP As Integer
Nconjuntosparalelo = 0
A = E1X
B = E1Y
A = A + 2
Yaux1 = B - 1
Yaux2 = B + 1
XPS = 1
YPS = 1
E2XP = 0
E2YP = 0
For Xaux = A To LIX
If Cells(Xaux, Yaux1).Value <> "" Or Cells(Xaux, Yaux2).Value <> "" Then ' tem de realizar esta operação até ao fim
    If E2XP = 0 Then
        E2XP = A
        E2YP = B
    End If
    Nconjuntosparalelo = Nconjuntosparalelo + 1
    MyArrayinicioefimdeparalelos(XPS, YPS) = A
    YPS = YPS + 1

End If
A = A + 2
Xaux = Xaux + 1
Next
If Nconjuntosparalelo > 1 Then ' Quando só existem dois elementos em paralelo, Nconjuntosparalelo = 1!
    Nconjuntosparalelo = Nconjuntosparalelo / 2
End If
.....
If Nconjuntosparalelo > 0 Then
    EPL = 0
    EPR = 0
    x = E2XP ' Coordenada em y do 1º elemento em Paralelo
    y = E2YP ' Coordenada em x do 1º elemento em Paralelo
    Cells(x, y).Select
    y = y - 2
    Do While Cells(x, y).Value <> ""

```

```
        EPL = EPL + 1
        Y = Y - 2
    Loop
x = E2XP
y = E2YP
    Cells(x, y).Select
        y = y + 2
        Do While Cells(x, y).Value <> ""
            EPR = EPR + 1
            y = y + 2
        Loop
    Nelementosparalelo = EPR + EPL + 1
End If
End Sub
```

### 9.1.9. Entrada de dados

```

Sub Entradadedados()
If Escolha = False Then ' Valores padrão
  If Nelementosparalelo < 1 Then
    MsgBox "Este é um sistema com elementos apenas em serie!", , "SISTEMA SERIE"
    'Entradadedadosuserform.Show
    If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
      Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
    ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
      Sistemanaoperigosouserform.Show
    End If
    Call Calculoelementosserie ' Módulo dos cálculos
  ElseIf Nelementosparalelo > 0 Or Nconjuntosparalelo > 0 Then
    MsgBox "Este é um sistema com elementos em serie e em paralelo!", , "SISTEMA COMPOSTO" ' APAGAR DPS
    'Entradadedadosuserform.Show
    'Tiporedundanciauserform.Show
    'Call Redundancia
    If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
      Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
    ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
      Sistemanaoperigosouserform.Show
    End If
    Call Calculoelementosparalelo ' Módulos dos cálculos
  End If
ElseIf Escolha = True Then 'Entrada de dados manualmente
  If Nelementosparalelo < 1 Then
    MsgBox "Este é um sistema com elementos apenas em serie!", , "SISTEMA SERIE" ' APAGAR DPS
    'Entradadedadosuserform.Show
    'Sistema perigoso = 1
    If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
      Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
    ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso
      Sistemanaoperigosouserform.Show
    End If
    Call CalculoelementosserieII ' Módulo dos cálculos
  ElseIf Nelementosparalelo > 0 Or Nconjuntosparalelo > 0 Then
    MsgBox "Este é um sistema com elementos em serie e em paralelo!", , "SISTEMA COMPOSTO" ' APAGAR DPS
    'Entradadedadosuserform.Show
    'Tiporedundanciauserform.Show
    'Call Redundancia
    If Sistemaperigoso = 1 Then ' Sistema perigoso
      Sistemaperigosouserform.Show ' Não está a trabalhar
    ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then 'Sistema não perigoso

```

```
        Sistemaoperigosouserform.Show
    End If
    Call CalculoelementosparaleloII ' Módulos dos cálculos
End If
End Sub
```

### 9.1.10. Cálculos

```

Sub Calculoelementosserie() ' Valores padrão
Dim x, y, w, z, k As Integer
Dim Elemento_aux
Dim Tf_aux As Integer
Dim EFX_aux As Integer
Dim BDF As Integer
BDF = 104
Sheets("Base de dados").Select
z = 4
  For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
    If Cells(w, z).Value = EP Then
      z = z + 2
      EP_F = Cells(w, z)
    End If
  Next
z = 4
  For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
    k = Application.WorksheetFunction.CountA(Worksheets("Sistema em Paralelo").Range("C3:U21"))
    If k > 3 Then
      If Cells(w, z).Value = ES Then
        z = z + 2
        ES_F = Cells(w, z)
      End If
    ElseIf k < 4 Then
      ES_F = 0
    End If
  Next
z = 4
  For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
    If Cells(w, z).Value = EF Then
      z = z + 2
      EF_F = Cells(w, z)
    End If
  Next
Sheets("Sistema em Paralelo").Select
Tf = EP_F + ES_F + EF_F
If EFX > 7 Then
  EFX = EFX - 2
  For EFX_aux = E2X + 2 To EFX
    Elemento_aux = Cells(EFX_aux, E1Y)
    Sheets("Base de dados").Select
    z = 4
  Next
End If
End Sub

```

```

        For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
            If Cells(w, z).Value = Elemento_aux Then
                z = z + 2
                Elemento_aux = Cells(w, z)
            End If
        Next
        EFX_aux = EFX_aux + 1
        Tf = Tf + Elemento_aux
        Sheets("Sistema em Paralelo").Select
    Next
End If
MTTFhoras = 1 / Tf
MTTFanos = MTTFhoras / (Ano * Dia)
Rt = ((Exp(-Tf * Tempo * Mes)) * 100) * (DisponibilidadeEnergia / 100)
Qt = 100 - Rt
.....
PFDmed = (1 + (DisponibilidadeEnergia / 100) * ((e ^ (-Tf * (Tempo * Mes)) - 1) / (Tf * (Tempo * Mes)))) * 100
.....
Tf_D = L_D * Tf ' Taxa de falhas detectáveis
Tf_U = L_U * Tf ' Taxa de falhas indetectáveis
MDT = ((Tf_U / Tf) * ((Tempo * Mes * 0.5) + Temporeparacoes)) + ((Tf_D / Tf) * (Temporeparacoes))
PFD = Tf * MDT * 100
End Sub
.....
.....
.....
Sub CalculoelementosserieII() ' Valores introduzidos pelo utilizador
Dim x, y As Integer
EP_F = MyArrayTfalha(1, 1)
EF_F = MyArrayTfalha(1, 2)
Tf = EP_F + EF_F
For x = 2 To 12
    For y = 1 To 10
        Tf = Tf + MyArrayTfalha(x, y)
    Next
Next
MTTFhoras = 1 / Tf
MTTFanos = MTTFhoras / (Ano * Dia)
Rt = ((Exp(-Tf * Tempo * Mes)) * 100) * (DisponibilidadeEnergia / 100)
Qt = 100 - Rt
.....
PFDmed = (1 + (DisponibilidadeEnergia / 100) * ((e ^ (-Tf * (Tempo * Mes)) - 1) / (Tf * (Tempo * Mes)))) * 100

```

```

.....
Tf_D = L_D * Tf ' Taxa de falhas detectáveis
Tf_U = L_U * Tf ' Taxa de falhas indetectáveis
MDT = ((Tf_U / Tf) * ((Tempo * Mes * 0.5) + Temporeparacoes)) + ((Tf_D / Tf) * (Temporeparacoes))
PFD = Tf * MDT * 100
End Sub
.....
.....
.....
Sub Calculoelementosparalelo() ' Valores padrão
Dim w, z, k, x, y As Integer
Dim Inicio1, Fim1, Inicio2, Fim2, Inicio3, Fim3, Inicio4, Fim4 As Integer
Dim BDF As Integer
Dim XPS, YPS As Integer
Dim Vardeteste
Dim Vardeteste_F
Dim REP_F, REF_F As Double
Dim RPar1, RPar2, RPar3, RPar4
Dim Raux1, Rauxf1, Rauxfinal1 As Double
Dim Raux2, Rauxf2, Rauxfinal2 As Double
Dim Raux3, Rauxf3, Rauxfinal3 As Double
Dim Raux4, Rauxf4, Rauxfinal4 As Double
Dim Serie1, Serie2, Serie3, Serie4 As Integer
Dim Serie1_F, Serie2_F, Serie3_F, Serie4_F As Integer
Dim Serie1Final, Serie2Final, Serie3Final, Serie4Final As Integer
Dim RtCalculo
Dim Tfee
.....
'Inicializar variáveis
Raux1 = 1
Rauxf1 = 0
Raux2 = 1
Rauxf2 = 0
Raux3 = 1
Rauxf3 = 0
Raux4 = 1
Rauxf4 = 0
RPar1 = 1
RPar2 = 1
RPar3 = 1
RPar4 = 1
Rauxfinal1 = 1

```

```

Rauxfinal2 = 1
Rauxfinal3 = 1
Rauxfinal4 = 1
Serie1Final = 1
Serie2Final = 1
Serie3Final = 1
Serie4Final = 1

If RedundanciaValue = 1 Then ' É PARA APAGAR

ElseIf RedundanciaValue = 2 Then
    BDF = 104
    Sheets("Base de dados").Select
    z = 4
    For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
        If Cells(w, z).Value = EP Then
            z = z + 2
            EP_F = Cells(w, z)
        End If
    Next
    z = 4
    For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
        If Cells(w, z).Value = EF Then
            z = z + 2
            EF_F = Cells(w, z)
        End If
    Next

.....
Sheets("Sistema em Paralelo").Select
REP_F = ((Exp(-EP_F * Tempo * Mes))) 'Fiabilidade do elemento principal
REF_F = ((Exp(-EF_F * Tempo * Mes))) 'Fiabilidade do elemento final
.....

Inicio1 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 1)
Fim1 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 2)
Inicio2 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 3)
Fim2 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 4)
Inicio3 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 5)
Fim3 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 6)
Inicio4 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 7)
Fim4 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 8)
.....

If Inicio1 <> 0 And Fim1 <> 0 Then

```

```

For y = LSY To LIY
  For x = Inicial1 To Fim1
    If Cells(x, y) <> "" Then
      Vardeteste = Cells(x, y).Value
      Sheets("Base de dados").Select
      z = 4
      For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
        If Cells(w, z).Value = Vardeteste Then
          z = z + 2
          Vardeteste_F = Cells(w, z)
        End If
      Next
      Sheets("Sistema em paralelo").Select
      Raux1 = ((Exp(-Vardeteste_F * Tempo * Mes))) * Raux1
    End If
    x = x + 1
  Next
  If Raux1 <> 1 Then
    Rauxf1 = (1 - Raux1)
    RPar1 = Rauxf1 * RPar1
  End If
  Raux1 = 1
  Rauxf1 = 0
  y = y + 1
Next
Rauxfinal1 = 1 - RPar1
End If
.....
If Inicial2 <> 0 And Fim2 <> 0 Then
  For y = LSY To LIY
    For x = Inicial2 To Fim2
      If Cells(x, y) <> "" Then
        Vardeteste = Cells(x, y).Value
        Sheets("Base de dados").Select
        z = 4
        For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
          If Cells(w, z).Value = Vardeteste Then
            z = z + 2
            Vardeteste_F = Cells(w, z)
          End If
        Next
        Sheets("Sistema em paralelo").Select
      End If
    Next
  Next
End If

```

```

        Raux2 = ((Exp(-Vardeteste_F * Tempo * Mes))) * Raux2
    End If
    x = x + 1
Next
If Raux2 <> 1 Then
    Rauxf2 = (1 - Raux2)
    RPar2 = Rauxf2 * RPar2
End If
Raux2 = 1
Rauxf2 = 0
y = y + 1
Next
Rauxfinal2 = 1 - RPar2
End If
.....
If Inicio3 <> 0 And Fim3 <> 0 Then
    For y = LSY To LIY
        For x = Inicio3 To Fim3
            If Cells(x, y) <> "" Then
                Vardeteste = Cells(x, y).Value
                Sheets("Base de dados").Select
                z = 4
                For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
                    If Cells(w, z).Value = Vardeteste Then
                        z = z + 2
                        Vardeteste_F = Cells(w, z)
                    End If
                Next
                Sheets("Sistema em paralelo").Select
                Raux3 = ((Exp(-Vardeteste_F * Tempo * Mes))) * Raux3
            End If
            x = x + 1
        Next
        If Raux3 <> 1 Then
            Rauxf3 = (1 - Raux3)
            RPar3 = Rauxf3 * RPar3
        End If
        Raux3 = 1
        Rauxf3 = 0
        y = y + 1
    Next
    Rauxfinal3 = 1 - RPar3

```

```

End If
.....
If Início4 <> 0 And Fim4 <> 0 Then
  For y = LSY To LIY
    For x = Início4 To Fim4
      If Cells(x, y) <> "" Then
        Vardeteste = Cells(x, y).Value
        Sheets("Base de dados").Select
        z = 4
        For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
          If Cells(w, z).Value = Vardeteste Then
            z = z + 2
            Vardeteste_F = Cells(w, z)
          End If
        Next
        Sheets("Sistema em paralelo").Select
        Raux4 = ((Exp(-Vardeteste_F * Tempo * Mes)) * Raux4)
      End If
      x = x + 1
    Next
    If Raux4 <> 1 Then
      Rauxf4 = (1 - Raux4)
      RPar4 = Rauxf4 * RPar4
    End If
    Raux4 = 1
    Rauxf4 = 0
    y = y + 1
  Next
  Rauxfinal4 = 1 - RPar4
End If
.....
If Início2 <> 0 Then
  Aux1 = Início2 - Fim1
End If
If Início3 <> 0 Then
  Aux2 = Início3 - Fim2
End If
If Início4 <> 0 Then
  Aux3 = Início4 - Fim3
End If
If Fim4 <> 0 Then
  Aux4 = EFX - Fim4

```

```

End If
.....
If Aux1 > 2 Then
  For y = LSY To LIY
    For x = Fim1 + 2 To Inicio2 - 2
      If Cells(x, y) <> "" Then
        Serie1 = Cells(x, y).Value
        Sheets("Base de dados").Select
          z = 4
          For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
            If Cells(w, z).Value = Serie1 Then
              z = z + 2
              Serie1_F = Cells(w, z)
            End If
          Next
        Sheets("Sistema em paralelo").Select
        Serie1Final = ((Exp(-Serie1_F * Tempo * Mes))) * Serie1Final
      End If
      x = x + 1
    Next
  Next
End If
If Aux2 > 2 Then
  For y = LSY To LIY
    For x = Fim2 + 2 To Inicio3 - 2
      If Cells(x, y) <> "" Then
        Serie2 = Cells(x, y).Value
        Sheets("Base de dados").Select
          z = 4
          For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
            If Cells(w, z).Value = Serie2 Then
              z = z + 2
              Serie2_F = Cells(w, z)
            End If
          Next
        Sheets("Sistema em paralelo").Select
        Serie2Final = ((Exp(-Serie2_F * Tempo * Mes))) * Serie2Final
      End If
      x = x + 1
    Next
  Next
End If

```

```

Next
End If
If Aux3 > 3 Then
  For y = LSY To LIY
    For x = Fim3 + 2 To Inicio4 - 2
      If Cells(x, y) <> "" Then
        Serie3 = Cells(x, y).Value
        Sheets("Base de dados").Select
          z = 4
          For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
            If Cells(w, z).Value = Serie3 Then
              z = z + 2
              Serie3_F = Cells(w, z)
            End If
          Next
        Sheets("Sistema em paralelo").Select
        Serie3Final = ((Exp(-Serie3_F * Tempo * Mes))) * Serie3Final
      End If
      x = x + 1
    Next
    y = y + 1
  Next
End If
If Aux4 > 2 Then
  For y = LSY To LIY
    For x = Fim4 + 2 To EFX - 2
      If Cells(x, y) <> "" Then
        Serie4 = Cells(x, y).Value
        Sheets("Base de dados").Select
          z = 4
          For w = 4 To BDF 'Valor inicial e final da base de dados de taxa de falhas dos elemento na sheet base de dados
            If Cells(w, z).Value = Serie4 Then
              z = z + 2
              Serie4_F = Cells(w, z)
            End If
          Next
        Sheets("Sistema em paralelo").Select
        Serie4Final = ((Exp(-Serie4_F * Tempo * Mes))) * Serie4Final
      End If
      x = x + 1
    Next
    y = y + 1
  Next
End If

```

```

Next
End If
.....
RtCalculo = (REP_F * REF_F * Rauxfinal1 * Rauxfinal2 * Rauxfinal3 * Rauxfinal4 * Serie1Final * Serie2Final * Serie3Final * Serie4Final * 100)
Rt = RtCalculo * (DisponibilidadeEnergia / 100)
Tf = -(((Log(Rt / 100) / Log(e)) / (Tempo * Mes)))
Tfee = -(((Log(RtCalculo / 100) / Log(e)) / (Tempo * Mes)))
MTTForas = 1 / Tf
MTTFanos = MTTForas / (Ano * Dia)
Qt = 100 - Rt
.....
Select Case Sistemaperigoso
Case Is = 1
'Redundância Plena e Sistema Perigoso
' Faltam os cálculos para sistemas perigosos

.....
' NÃO SE VAI REALIZAR NESTA EDIÇÃO ESTES CALCULOS '
.....

Case Is = 2
'Redundância Plena e Sistema não perigoso
.....
PFDmed = (1 + (DisponibilidadeEnergia / 100) * ((e ^ (-Tfee * (Tempo * Mes)) - 1) / (Tfee * (Tempo * Mes)))) * 100
.....
Tf_D = L_D * Tf ' Taxa de falhas detectáveis
Tf_U = L_U * Tf ' Taxa de falhas indetectáveis
MDT = ((Tf_U / Tf) * ((Tempo * Mes * 0.5) + Temporeparacoes)) + ((Tf_D / Tf) * (Temporeparacoes))
PFD = Tf * MDT * 100
End Select
End If
End Sub
.....
.....
.....
Sub CalculoelementosparaleloII() ' Valores introduzidos pelo utilizador
Dim x, y As Integer
Dim w, z, k As Integer
Dim Inicio1, Fim1, Inicio2, Fim2, Inicio3, Fim3, Inicio4, Fim4 As Integer
Dim BDF As Integer
Dim XPS, YPS As Integer
Dim Vardeteste
Dim Vardeteste_F

```

```

Dim REP_F, REF_F As Double
Dim Raux1, Rauxf1, Rauxfinal1 As Double
Dim Raux2, Rauxf2, Rauxfinal2 As Double
Dim Raux3, Rauxf3, Rauxfinal3 As Double
Dim Raux4, Rauxf4, Rauxfinal4 As Double
Dim RPar1, RPar2, RPar3, RPar4
Dim Serie0, Serie1, Serie2, Serie3, Serie4 As Integer
Dim Serie1_F, Serie2_F, Serie3_F, Serie4_F As Integer
Dim Serie0Final, Serie1Final, Serie2Final, Serie3Final, Serie4Final As Integer
Dim SerieTotal As Integer 'Elementos em serie no sistema composto 02/05/2014
Dim Nel As Integer 'Nº de elementos em serie no sistema composto 02/05/2014
Dim RtCalculo
Dim Tfee
.....
'Inicializar variáveis
Raux1 = 1
Rauxf1 = 0
Raux2 = 1
Rauxf2 = 0
Raux3 = 1
Rauxf3 = 0
Raux4 = 1
Rauxf4 = 0
RPar1 = 1
RPar2 = 1
RPar3 = 1
RPar4 = 1
Rauxfinal1 = 1
Rauxfinal2 = 1
Rauxfinal3 = 1
Rauxfinal4 = 1
Serie0 = 0
Serie1 = 0
Serie2 = 0
Serie3 = 0
Serie4 = 0
Serie0Final = 1
Serie1Final = 1
Serie2Final = 1
Serie3Final = 1
Serie4Final = 1
.....

```

```

'Cálculo da fiabilidade do elemento principal e do final
EP_F = MyArrayTfalha(1, 1) ' Taxa de falhas do elemento principal
EF_F = MyArrayTfalha(1, 2) ' Taxa de falhas do elemento final
REP_F = ((Exp(-EP_F * Tempo * Mes))) 'Fiabilidade do elemento principal
REF_F = ((Exp(-EF_F * Tempo * Mes))) 'Fiabilidade do elemento final
.....
'Definição de elementos em paralelo
Inicio1 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 1)
Fim1 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 2)
Inicio2 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 3)
Fim2 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 4)
Inicio3 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 5)
Fim3 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 6)
Inicio4 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 7)
Fim4 = MyArrayinicioefimdeparalelos(1, 8)
.....
' Exceção para o caso de apenas dois elementos em paralelo.
If Inicio1 <> "" And Fim1 = 0 Then
Fim1 = Inicio1
End If
If Inicio2 <> "" And Fim2 = 0 Then
Fim2 = Inicio2
End If
If Inicio3 <> "" And Fim3 = 0 Then
Fim3 = Inicio3
End If
If Inicio4 <> "" And Fim4 = 0 Then
Fim4 = Inicio4
End If
.....
If RedundanciaValue = 1 Then ' É PARA APAGAR

ElseIf RedundanciaValue = 2 Then
  If Inicio1 <> 0 And Fim1 <> 0 Then
    For y = LSY To LIY
      For x = Inicio1 To Fim1
        If Cells(x, y) <> "" Then
          Vardeteste = MyArrayTfalha(x, y)
          Raux1 = ((Exp(-Vardeteste * Tempo * Mes))) * Raux1
        End If
        x = x + 1
      Next x
    Next y
  End If

```

```

Next
If Raux1 <> 1 Then
Rauxf1 = (1 - Raux1)
RPar1 = Rauxf1 * RPar1
End If
Raux1 = 1
Rauxf1 = 0
y = y + 1
Next
Rauxfinal1 = 1 - RPar1 ' Fiabilidade de elementos em paralelo.
End If
.....
If Inicio2 <> 0 And Fim2 <> 0 Then
For y = LSY To LIY
For x = Inicio2 To Fim2
If Cells(x, y) <> "" Then
Vardeteste = MyArrayTfalha(x, y)
Raux2 = ((Exp(-Vardeteste * Tempo * Mes))) * Raux2
End If
x = x + 1
Next
If Raux2 <> 1 Then
Rauxf2 = (1 - Raux2)
RPar2 = Rauxf2 * RPar2
End If
Raux2 = 1
Rauxf2 = 0
y = y + 1
Next
Rauxfinal2 = 1 - RPar2 ' Fiabilidade de elementos em paralelo.
End If
.....
If Inicio3 <> 0 And Fim3 <> 0 Then
For y = LSY To LIY
For x = Inicio3 To Fim3
If Cells(x, y) <> "" Then
Vardeteste = MyArrayTfalha(x, y)
Raux3 = ((Exp(-Vardeteste * Tempo * Mes))) * Raux3
End If
x = x + 1
Next
If Raux3 <> 1 Then

```

```

    Rauxf3 = (1 - Raux3)
    RPar3 = Rauxf3 * RPar3
  End If
  Raux3 = 1
  Rauxf3 = 0
  y = y + 1
Next
Rauxfinal3 = 1 - RPar3 ' Fiabilidade de elementos em paralelo.
End If
.....
If Inicio4 <> 0 And Fim4 <> 0 Then
For y = LSY To LIY
  For x = Inicio4 To Fim4
    If Cells(x, y) <> "" Then
      Vardeteste = MyArrayTfalha(x, y)
      Raux4 = ((Exp(-Vardeteste * Tempo * Mes))) * Raux4
    End If
    x = x + 1
  Next
  If Raux4 <> 1 Then
    Rauxf4 = (1 - Raux4)
    RPar4 = Rauxf4 * RPar4
  End If
  Raux4 = 1
  Rauxf4 = 0
  y = y + 1
Next
Rauxfinal4 = 1 - RPar4 ' Fiabilidade de elementos em paralelo.
End If
.....
If Inicio1 <> 0 Then
  Aux0 = Inicio1 - EP_F
End If
If Inicio2 <> 0 Then
  Aux1 = Inicio2 - Fim1
End If
If Inicio3 <> 0 Then
  Aux2 = Inicio3 - Fim2
End If
If Inicio4 <> 0 Then
  Aux3 = Inicio4 - Fim3
End If

```

```

If Fim4 <> 0 Then
    Aux4 = EFX - Fim4
End If
.....
If Aux0 > 2 Then
    For y = LSY To LIY
        For x = E1X + 2 To Inicio1 - 2
            If Cells(x, y) <> "" Then
                Serie0 = MyArrayTfalha(x, y) + Serie0
            End If
            x = x + 1
        Next
        y = y + 1
    Next
    Serie0Final = ((Exp(-Serie0 * Tempo * Mes)))
End If
If Aux1 > 2 Then
    For y = LSY To LIY
        For x = Fim1 + 2 To Inicio2 - 2
            If Cells(x, y) <> "" Then
                Serie1 = MyArrayTfalha(x, y) + Serie1
            End If
            x = x + 1
        Next
        y = y + 1
    Next
    Serie1Final = ((Exp(-Serie1 * Tempo * Mes)))
End If
If Aux2 > 2 Then
    For y = LSY To LIY
        For x = Fim2 + 2 To Inicio3 - 2
            If Cells(x, y) <> "" Then
                Serie2 = MyArrayTfalha(x, y) + Serie2
            End If
            x = x + 1
        Next
        y = y + 1
    Next
    Serie2Final = ((Exp(-Serie2 * Tempo * Mes)))
End If
If Aux3 > 3 Then
    For y = LSY To LIY

```

```

    For x = Fim3 + 2 To Inicio4 - 2
        If Cells(x, y) <> "" Then
            Serie3 = MyArrayTfalha(x, y) + Serie3
        End If
        x = x + 1
    Next
    y = y + 1
Next
Serie3Final = ((Exp(-Serie3 * Tempo * Mes)))
End If
If Aux4 > 2 Then
    For y = LSY To LIY
        For x = Fim4 + 2 To EFX - 2
            If Cells(x, y) <> "" Then
                Serie4 = MyArrayTfalha(x, y) + Serie4
            End If
            x = x + 1
        Next
        y = y + 1
    Next
    Serie4Final = ((Exp(-Serie4 * Tempo * Mes)))
End If
.....
RtCalculo = (REP_F * REF_F * Rauxfinal1 * Rauxfinal2 * Rauxfinal3 * Rauxfinal4 * Serie0Final * Serie1Final * Serie2Final * Serie3Final * Serie4Final * 1
Rt = RtCalculo * (DisponibilidadeEnergia / 100)
Tf = -(((Log(RtCalculo / 100) / Log(e)) / (Tempo * Mes)))
Tfee = -(((Log(RtCalculo / 100) / Log(e)) / (Tempo * Mes)))
MTTFhoras = 1 / Tf
MTTFanos = MTTFhoras / (Ano * Dia)
Qt = 100 - Rt
.....
Select Case Sistemaperigoso
Case Is = 1
    'Redundância Plena e Sistema Perigoso
    ' Faltam os cálculos para sistemas perigosos
        .....
        ' NÃO SE VAI REALIZAR NESTA EDIÇÃO ESTES CALCULOS '
        .....

Case Is = 2
    'Redundância Plena e Sistema não perigoso

```

```
.....  
PFDmed = (1 + (DisponibilidadeEnergia / 100) * ((e ^ (-Tfee * (Tempo * Mes)) - 1) / (Tfee * (Tempo * Mes)))) * 100  
.....  
Tf_D = L_D * Tf ' Taxa de falhas detectáveis  
Tf_U = L_U * Tf ' Taxa de falhas indetectáveis  
MDT = ((Tf_U / Tf) * ((Tempo * Mes * 0.5) + Temporeparacoes)) + ((Tf_D / Tf) * (Temporeparacoes))  
PFD = Tf * MDT * 100  
End Select  
End If  
End Sub
```

### 9.1.11. Apresentar resultados

```

Sub Apresentaçoresultados ()

If Nelementosparalelo = 1 Then
    Sheets("Relatório").Range("F6") = " Sistema Serie "
    Sheets("Relatório").Range("F7") = " Não existe redundância! "
ElseIf Nelementosparalelo > 1 Or Nconjuntosparalelo > 1 Then
    Sheets("Relatório").Range("F6") = " Sistema Composto (Serie e Paralelo) "
End If
If RedundanciaValue = 1 Then
    Sheets("Relatório").Range("F7") = " Redundância Parcial "
ElseIf RedundanciaValue = 2 Then
    Sheets("Relatório").Range("F7") = " Redundância Plena "
End If
If Sistemaperigoso = 1 Then
    Sheets("Relatório").Range("F13") = " Sistema Perigoso "
ElseIf Sistemaperigoso = 2 Then
    Sheets("Relatório").Range("F13") = " Sistema Não Perigoso "
End If
Sheets("Relatório").Range("G15") = L_D * 100
Sheets("Relatório").Range("G16") = B_D

Sheets("Relatório").Range("F8") = DisponibilidadeEnergia 'Disponibilidade da Energia electrica
Sheets("Relatório").Range("F10") = Tempo 'Intervalo entre manutenções
Sheets("Relatório").Range("F11") = Temporeparacoes 'Duração das reparações
Sheets("Relatório").Range("G20") = Tf 'Taxa de falhas
Sheets("Relatório").Range("G26") = MTTFanos 'Tempo médio até a falha em anos
Sheets("Relatório").Range("G27") = MTTFhoras 'Tempo médio até a falha em horas
Sheets("Relatório").Range("G22") = Rt 'Fiabilidade
Sheets("Relatório").Range("G24") = Qt 'Indisponibilidade
Sheets("Relatório").Range("G29") = PFDmed 'Probabilidade média de falha
Sheets("Relatório").Range("G31") = PFD 'Probabilidade de falha á chamada
Sheets("Relatório").Range("G33") = MDT 'Tempo médio de paragem

MsgBox " Verifique os resultados na aba relatório"

End Sub

```

### 9.1.12. Limpar a folha

```
Sub Limparplanilha()  
  Range("B2:V22").Select  
  Selection.ClearContents  
End Sub
```