

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Eficiência energética de transporte vertical

Tiago Ruibal de Azevedo Pires

Relatório de Projecto realizado no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. José Rui da Rocha Pinto Ferreira

Janeiro de 2009

Projecto intitulado

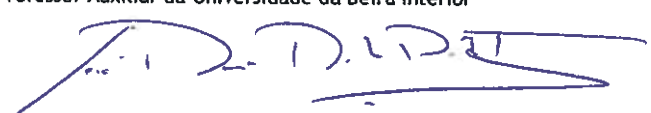
**“DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA
TRANSPORTE VERTICAL”**

foi aprovada em provas realizadas em 26/Fevereiro/2009

o júri

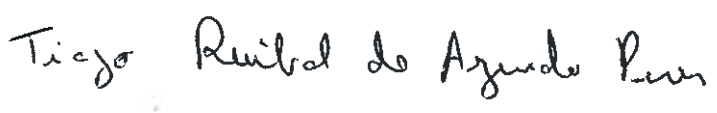
presidente  Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes Costa
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

 Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

 Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados

Autor - Tiago Ruibal de Azevedo Pires



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

O presente trabalho visa analisar soluções de eficiência energética vocacionadas para o transporte vertical. Alcançar a eficiência energética é uma necessidade imperativa no panorama actual que vivemos. Assim sendo, neste trabalho foram identificadas as áreas passíveis de optimização no universo do transporte vertical.

As instalações de elevadores e escadas rolantes ganham vida através dos motores eléctricos, que se encontram actualmente em fase de mudança tecnológica, com a emergência de novas tecnologias como o rotor em cobre ou os ímanes permanentes (PMSM), que possibilitam rendimentos superiores tendo menores exigências de espaço permitindo um novo conceito de elevadores, sem casa de máquinas (MRL). Com esta mudança, surgiu a necessidade de rever a classificação energética dos motores, de modo a incluir as tecnologias emergentes. Assim sendo, a nova classificação internacional (IEC 60034-30) foi também objecto de análise neste trabalho.

A necessidade de avaliar o desempenho das instalações de transporte vertical de forma inequívoca, obrigou à criação de uma norma internacional que ainda se encontra em estudo, ao abrigo de um projecto liderado pela Universidade de Coimbra (Projecto E4). Algumas considerações sobre a mesma foram efectuadas neste relatório.

Tendo em mente premissas como “a energia mais barata é aquela que não se consome” ou “não podemos gerir aquilo que não medimos”, foi efectuado um estudo prático numa instalação de escadas rolantes, tendo sido desenvolvido e construído um equipamento de monitorização de tráfego de modo a permitir analisar a viabilidade da implementação de algumas das soluções de eficiência energética existentes no mercado.

Palavras-chave: Eficiência Energética; transporte vertical; ímanes permanentes; rotor em cobre; elevadores sem casa de máquinas (MRL); classificação energética; Projecto E4.

Abstract

This study aims to examine energy efficiency solutions related to the vertical transport. Achieving energy efficiency is an imperative need in our current view. Therefore, in this work were identified the optimization likely areas of the vertical transportation world.

The elevators and escalators come to life through electric motors, which are currently changing technological process, with the emergence of new technologies such as copper rotor or permanent magnets (PMSM), which enable higher efficiency and lower requirements allowing space for a new lift concept, without machine room (MRL). With this change, was necessary to review the energy rating of the engines, in order to include emerging technologies. Thus, the new international classification (IEC 60034-30) was also under review in this paper.

The need to evaluate the performance of vertical transportation facilities unequivocally, forced the creation of an international standard that is still under study, led by the University of Coimbra (E4 Project). Some considerations of this project were made in this report.

Having in mind assumptions as "the cheapest energy is one that does not consume" or "we can not manage what you do not measure", it was conducted a study in a practical installation of escalators, it was developed and built a traffic monitoring equipment to analyze the feasibility of implementing some of the market solutions for energy efficiency.

Keywords: Energy Efficiency; vertical transportation; permanent magnet; cooper rotor; machine room-less lifts (MRL), energy rating; E4 Project.

Résumé

Ce travail vise analyser des solutions d'efficacité énergétique ciblées pour le transport vertical.

L'efficacité énergétique est une priorité dans le panorama actuel.

Dans la suite de cet encadrement, une étude approfondie se soutiendra dans les différents domaines d'intervention visant l'univers du transport vertical.

Les installations d'ascenseurs et échelles roulantes se soutiennent dans les moteurs électriques, qui se rencontrent cependant en état de virage technologique avec l'apparition des *PMSM*, qui permettent une plus grande efficacité et une diminution des besoins d'espace pour permettre un nouveau concept ascenseur sans local des machines (MRL). Avec ce virage, a apparu la nécessité de revoir la classification énergétique des moteurs, de façon à inclure les technologies émergentes. De cette forme, la nouvelle classification (IEC 60034-30) a été aussi l'objet d'étude de ce travail.

Le besoin d'évaluer la performance des installations de transport vertical d'une forme unique, a conduit à la création d'une nouvelle norme internationale qui se rencontre encore en étude par un projet conduit par "Universidade de Coimbra - (Projecto E4)". Quelques considérations à propos de cette norme ont été aussi référenciées.

Sous l'optique de permisses comme "L'énergie la moins chère est laquelle qu'on ne consomme pas" ou encore "On ne peut pas gérer ce qu'on ne mesure pas", a été effectué une étude pratique dans une installation d'échelles roulantes, ayant été développé et construit un équipement de surveillance de trafic de façon à permettre l'analyse et l'implémentation de quelques solutions existantes dans ce marché.

Mots-clés: l'efficacité énergétique, transport vertical; aimant permanent; coopér rotor; ascenseur sans local des machines (MRL), classification énergétique; E4 projet.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado durante o segundo semestre de 2008, na empresa Edifícios Saudáveis Consultores.

Quero agradecer a todas as pessoas que estiveram envolvidas na elaboração deste trabalho, especialmente ao Professor José Rui Ferreira, orientador deste projecto, pela sua inteira disponibilidade, mesmo em alturas complicadas e pelas valiosas sugestões e correcções ao longo do trabalho.

Queria também agradecer ao Eng. Ricardo Sá, por me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho na empresa e pela forte motivação que me transmitiu.

Quero também saudar todos os meus colegas da Edifícios, e em especial os membros da HBS & Associados, uma sociedade que se afirmou como incubadora de mestres onde sempre imperou a boa disposição.

Estou muito grato ao Filipe, à Marlene, à Ana, ao Pedro e ao Hélder pela amizade, disponibilidade e ajuda durante a realização deste projecto.

Estou profundamente contente com a minha família, pois penso que me deu uma boa base para a vida, estando também agradecido por todo o apoio e força que sempre me deram.

Finalmente, uma nota especial de agradecimento para a Eng. Mafalda, que foi responsável por algum entusiasmo extra, vector fundamental neste projecto.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Résumé	vii
Agradecimentos	ix
Índice	xi
Lista de figuras	xiv
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xviii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Motivação – O problema energético	1
1.2. Estrutura do relatório	3
Capítulo 2	5
Considerações sobre os motores eléctricos usados em transporte vertical	5
2.1. Eficiência em motores eléctricos	5
2.1.1. Classificação internacional de eficiência para os motores eléctricos (IEC 60034-30)	7
2.2. Motores de indução com rotor em gaiola de esquilo	13
2.3. Motores síncronos de ímanes permanentes (PMSM)	15
2.4. Considerações sobre o factor de potência	16
Capítulo 3	19
Sistemas de transporte vertical	19
3.1. Elevadores	19
3.1.1. Elevadores de tracção eléctrica	19
3.1.2. Elevadores hidráulicos	21
3.1.3. Casa de máquinas	22
3.1.4. Contrapeso	22
3.1.5. Tipos de comando existentes	23
3.1.5.1. Ward-Leonard (M-G)	23

3.1.5.2.	<i>Silicon-Controlled Rectifier (SCR)</i>	23
3.1.5.3.	Controlo de tensão (ACVV)	24
3.1.5.4.	Controlo de tensão e frequência (VVVF)	24
3.2.	Escadas e tapetes rolantes	27
3.2.1.	Dimensionamento do motor	28
3.2.2.	Tipos de comando existentes	28
3.2.2.1.	Conexão estrela-triângulo	29
3.2.2.2.	Arrancadores suaves (<i>Soft-Starters</i>)	29
3.2.2.3.	Controladores de factor de potência	29
3.2.2.4.	Variadores de tensão e frequência em malha aberta (sem realimentação)	29
3.2.2.5.	Variadores de tensão e frequência em malha fechada (com realimentação)	29
Capítulo 4		31
Consumo de energia nos sistemas de transporte vertical		31
4.1. Medição de energia e conformidade (ISO/DIS 25745-1)		32
4.1.1. Fase de planeamento		33
4.1.1.1. Elevadores		33
4.1.1.2. Escadas rolantes		35
4.1.2. Fase de medição e verificação no local		36
4.1.3. Verificação de conformidade		39
4.2. Eficiência energética (ISO/DIS 25745-2)		40
4.2.1. Classificação VDI 4707		40
Capítulo 5		45
Dispositivo de monitorização de tráfego (LIMPP)		45
5.1. Descrição geral de funcionamento		45
5.2. Detalhes construtivos		47
5.2.1. Barreira de infravermelhos <i>Velleman MK120</i>		47
5.2.2. Interface de temporização		49
5.2.3. Interface luminosa		51
5.2.4. Interface de registo		52
5.2.5. Alimentação		53
Capítulo 6		55
Caso de Estudo: escadas rolantes		55
6.1. Tipo de soluções estudadas		55
6.1.1. Descrição da tecnologia da solução A (velocidade variável)		56
6.1.2. Descrição da tecnologia da solução B (velocidade constante)		57
6.1.3. Descrição da tecnologia da solução C (velocidade variável com optimização)		58
6.1.4. Aspectos comparativos entre os dois tipos de tecnologias estudadas		59
6.2. Objectivos do teste		60
6.3. Local de teste e dispositivos testados		60
6.4. Procedimentos de teste		61
6.5. Instrumentação utilizada		63
6.6. Condições de teste		63
6.7. Tratamento e análise de resultados		64
6.7.1. Escada rolante nº 7		64
6.7.2. Escada rolante nº 8		65
6.8. Balanço da auditoria		67
6.9. Soluções de eficiência energética estudadas		67
6.9.1. Solução A (variação de velocidade)		68
6.9.2. Solução B (optimização em função da carga)		69
6.9.3. Solução C (variação de velocidade e optimização em função da carga)		69
6.9.4. Substituição dos motores existentes por novos com tecnologia de ímanes permanentes (PMSM)		70
6.9.5. Conclusões		71

Capítulo 7	73
Conclusões	73
7.1. Conclusões do projecto	73
7.2. Trabalhos futuros	74
Referências.....	75
Anexo I	79
Anexo II.....	85

Lista de figuras

Figura 1.1 – Representação gráfica da evolução do consumo das várias fontes primárias de 1980 a 2030 tendo como base o cenário referência [2].....	2
Figura 1.2 – Desagregação das fontes utilizadoras de energia final de Portugal em 2004 [3]	2
Figura 2.1 – Distribuição de perdas nos motores de indução de 4 pólos com rotor em gaiola de esquilo, totalmente fechados e com arrefecimento por ventoinha (TEFC) em função da potência do motor. (Auinger 1997; Haataja 2003)	6
Figura 2.2 – Impacto relativo das diferentes áreas de melhoria na eficiência dos motores [6]	7
Figura 2.3 – Comparação dos vários níveis de eficiência pelo CEMEP [8]	9
Figura 2.4 – Comparação dos níveis IE3 e IE4 para as várias potências de saída (de acordo com IEC 60034-30, subtraindo 15% das perdas relativamente a IE3) [9].	10
Figura 2.5 – Comparação de eficiência entre motores ABB, Siemens e SEW [12].	12
Figura 2.6 – Relação peso/potência e eficiência dos motores do fabricante <i>Leroy-Somer</i> série LSRPM (Ímanes permanentes) [14].	12
Figura 2.7 – Representação gráfica do tipo de motores AC existentes na EU-25 (2006) [15].	13
Figura 2.8 – Pormenor de um rotor em cobre [16].	14
Figura 2.9 – Esquemático de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo [17]	14
Figura 2.10 – Diferentes tipos de estruturas do rotor [18]	15
Figura 2.11 – Desfasamento entre a tensão (V) e a corrente (I) num circuito de corrente alternada [20]	16
Figura 2.12 – Variação do rendimento e do factor de potência com o regime de carga num motor de indução com rotor em gaiola de esquilo [21]	17
Figura 2.13 – Factores de potência em função do binário para as diferentes velocidades relativas de um motor de indução protótipo. Representação do factor de potência de um motor de ímanes permanentes com controlo por corrente mínima em função do binário. [22]	17

Figura 3.1 – Esquemático de um elevador com casa de máquinas (à esquerda) [24] e outro sem casa de máquinas (à direita) [25].	20
Figura 3.2 – Esquemático de um elevador do tipo hidráulico [26]	21
Figura 3.3 – Esquema do tipo de comando <i>Ward-Leonard</i> .	23
Figura 3.4 – Esquema do tipo de comando <i>Silicon-Controlled Rectifier (SCR)</i> .	24
Figura 3.5 – Esquema do tipo de comando por variação de tensão (ACVV) e característica de binário/velocidade deste tipo de controlo. [29]	24
Figura 3.6 – Esquema do tipo de comando por variação de tensão e frequência (VVVF) e característica de binário/velocidade deste tipo de controlo. [29].	24
Figura 3.7 – Gráfico comparativo dos diferentes tipos de controlo existentes relativamente ao consumo de energia [32].	25
Figura 3.8 – Esquemático de uma escada rolante [33].	27
Figura 3.9 – Pormenor de um sensor ultra-sónico de aproximação numa escada rolante [34].	30
Figura 4.1 – Fluxograma dos vários sistemas de um edifício [23].	31
Figura 4.2 – Desagregação dos consumos por sistema num centro comercial padrão [35].	32
Figura 4.3 – Diagrama representativo do âmbito da norma ISO25745-1.	33
Figura 4.4 – Representação gráfica entre o consumo de energia e os passageiros transportados por uma escada rolante [38].	36
Figura 4.5 – Representação gráfica do consumo de energia e da altura ao solo numa viagem padrão (entre os pisos terminais) [39].	37
Figura 4.6 – Representação gráfica do consumo de energia durante uma viagem padrão nos circuitos principal e auxiliar [40].	38
Figura 4.7 – Esquemático dos circuitos eléctricos existentes num elevador [40].	39
Figura 4.8 – Representação gráfica dos diversos parâmetros de um motor eléctrico consoante a carga [41].	40
Figura 4.9 – Pormenor de um certificado energético para elevadores [42].	41
Figura 4.10 – Fluxograma representativo das várias etapas de classificação de um elevador.	44
Figura 5.1 – Fluxograma representativo do modo de funcionamento do LIMPP.	46
Figura 5.2 – Diagrama de blocos do módulo LIMPP.	47
Figura 5.3 – Esquema eléctrico do circuito emissor de infravermelhos [43].	48
Figura 5.4 – Esquema eléctrico do circuito receptor de infravermelhos [43].	48
Figura 5.5 – Pormenor do circuito do emissor de infravermelhos.	49
Figura 5.6 – Pormenor do circuito do receptor de infravermelhos.	49

Figura 5.7 – Montagem em atraso temporal do circuito 555.....	50
Figura 5.8 – Gráfico dos intervalos de temporização gerados pelo circuito 555 para alguns valores de RC [44].	51
Figura 5.9 – Pormenor da interface temporizadora do LIMPP.	51
Figura 5.10 – Gráfico da resposta do sensor de luz existente no HOBO U12-012 [45]	52
Figura 5.11 – Pormenor do <i>data logger</i> utilizado [45].	53
Figura 5.12 – Dispositivo LIMPP.....	53
Figura 6.1 – Relação entre as curvas de binário-velocidade dos motores de indução e a frequência fundamental da tensão de alimentação [29].	56
Figura 6.2 – Rendimento do sistema MI-VEV em função do factor de carga do motor de indução (MI) para diferentes valores da frequência de comutação (4, 8, 12 e 16 kHz) e para a mesma frequência fundamental (50Hz) [46].	57
Figura 6.3 – Relação entre as curvas de binário-velocidade dos motores de indução e a tensão de alimentação [29].	58
Figura 6.4 – Esquemático da ligação dos analisadores de energia	61
Figura 6.5 – Pormenor da montagem das pinças amperimétricas.....	61
Figura 6.6 – Esquema da montagem LIMPP na escada rolante nº 7 (ascendente).	62
Figura 6.7 – Esquema da montagem LIMPP na escada rolante nº 8 (descendente).....	62
Figura 6.8 – Pormenor da montagem do LIMPP.	62
Figura 6.9 – Pinça amperimétrica [47].	63
Figura 6.10 – Analisador de energia HT Vega 76 [48].	63
Figura 6.11 – Registo do factor de potência da instalação nº 7 durante os 7 dias de monitorização.	64
Figura 6.12 – Registo da potência activa da instalação nº 7 durante os 7 dias de monitorização.	64
Figura 6.13 – Registo do factor de potência versus tráfego na instalação nº 7 durante um período do dia 12/12/2008.	65
Figura 6.14 – Registo da potência activa da instalação nº8 durante os 7 dias de monitorização	66
Figura 6.15 – Registo da potência activa da instalação nº 8 durante os 7 dias de monitorização	66
Figura 6.16 – Registo do factor de potência versus tráfego na instalação nº 8 durante o dia 01/12/2008.....	66
Figura 6.17 – Variação do potencial de poupança em função do factor de potência [50]	69

Lista de tabelas

Tabela 2.1 — Correspondência das diversas normas existentes com a IEC 60034-30 [7].	8
Tabela 2.2 — Motores de alta eficiência dos principais fabricantes existentes no mercado.	11
Tabela 3.1 — Capacidade de regeneração dos vários tipos de comando existentes [30].	25
Tabela 4.1 — Número de viagens por dia consoante o tipo de edifício [37].	34
Tabela 4.2 — Resumo dos procedimentos a efectuar na fase de medição [36].	36
Tabela 4.3 — Resumo dos procedimentos a efectuar na fase de verificação de conformidade [36].	40
Tabela 4.4 — Valores máximos para a potência de <i>standby</i> mediante a classe [42].	41
Tabela 4.5 — Valores máximos para consumo em operação mediante a classe [42].	41
Tabela 4.6 — Tempos médios de viagem consoante a categoria de utilização do elevador [42].	42
Tabela 4.7 — Valores de consumo específico da instalação (mWh/Kg.m.d) consoante a classe de eficiência e a categoria de utilização do elevador.	43
Tabela 6.1 — Comparação entre as diversas soluções de optimização estudadas [29].	59
Tabela 6.2 — Características da instalação.	60
Tabela 6.3 — Balanço da operação semanal das escadas rolantes auditadas	67
Tabela 6.4 — Poupanças relativas à solução A	68
Tabela 6.5 — Poupanças relativas à solução B	69
Tabela 6.6 — Poupanças relativas à solução C	70
Tabela 6.7 — Poupanças relativas à substituição dos motores por PMSM	71
Tabela 6.8 — Quadro resumo do estudo técnico-económico das soluções de optimização estudadas.	71

Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas

ACVV	<i>Alternate Current Variable Voltage</i>
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
CEMEP	<i>European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DC	<i>Direct Current</i>
DIS	<i>Draft International Standard</i>
EU	<i>European Union</i>
HP	<i>Horsepower</i>
I	Corrente
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and electronics Engineers</i>
IP	<i>International Protection Rating</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LIMPP	Luz Intermitente Mediante Passagem de Pessoas
LSRPM	<i>Leroy-Somer Permanent Magnet</i>
M-G	Motor-Gerador
MRL	<i>Machine Room-Less</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PMSM	<i>Permanent magnet Synchronous Machine</i>
R	Resistência
RC	Resistência-Condensador
RPM	Rotações por minuto
SCR	<i>Silicon-Controlled Rectifier</i>
TC	Transdutor de corrente
TEFC	Totalmente fechados com arrefecimento por ventoinha
UE	União Europeia

URE	Utilização Racional de Energia
V	Tensão
VCC	Tensão de alimentação
VDI	<i>Association of German Engineers</i>
VEV	Variador Electrónico de Velocidade

Capítulo 1

Introdução

1.1. O problema energético

A gestão dos recursos de energia é hoje um dos principais desafios que, a nível mundial, a sociedade moderna enfrenta.

O desenvolvimento económico verificado nas últimas décadas, caracterizou-se pela utilização intensa da energia produzida a partir de recursos de origem fóssil. A natureza finita desses recursos naturais e o impacto ambiental da sua produção e consumo, alertaram o mundo para a necessidade de mudança.

O desafio é enorme e a solução de longo prazo está longe de ser conhecida mas, no curto e médio prazo, a acção tem de passar pela procura de fontes alternativas de energia, com ênfase especial para as renováveis e pelo aumento da eficiência na utilização das energias disponíveis.

O desafio que se coloca aos governos, às instituições e às empresas não se pode limitar à identificação de uma necessidade de mudança de rumo no paradigma energético. Tem necessariamente de passar pela definição do modo como essa mudança pode e deve ser realizada, garantindo o progresso social, o equilíbrio ambiental e o sucesso económico.

“O mundo não suporta mais esse padrão de consumo” – palavras de um dos mais conceituados professores em estudos ambientais dos EUA, Dan Perlman, com as quais critica o modelo económico dos países ricos e põe em causa o desenvolvimento sustentável [1].

Os combustíveis fósseis não são recursos naturais renováveis, pois possuem taxas de formação muito lentas em relação à escala temporal do Homem. Devido às energias renováveis como a biomassa, energia eólica, hídrica e energia das marés, e devido às sanções impostas pelo Protocolo de Quioto aos países industrializados para diminuírem a libertação de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, as energias alternativas ganharam ênfase no panorama actual. O consumo de energia pode reflectir tanto o grau de industrialização de um país como o grau de desenvolvimento e bem-estar da sua população em termos médios.

2 Introdução

A figura 1.1 mostra a evolução da dependência energética do Mundo, que é fortemente dependente dos recursos energéticos.

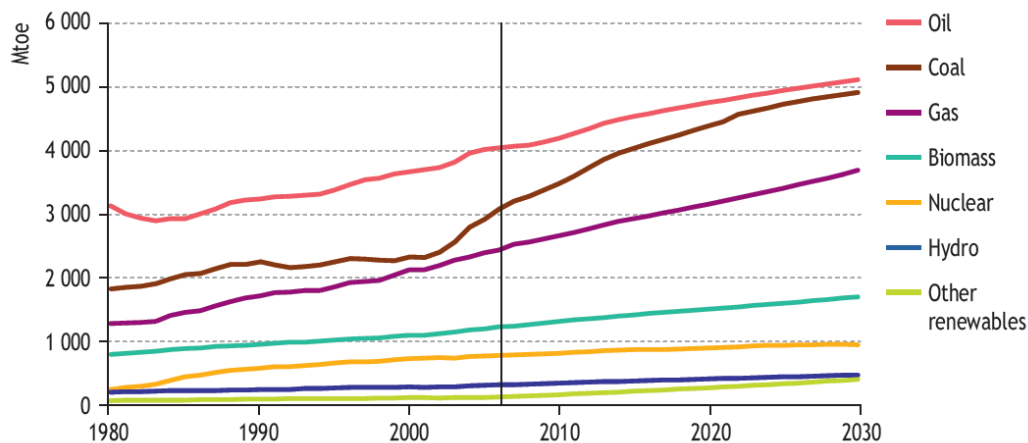


Figura 1.1 – Representação gráfica da evolução do consumo das várias fontes primárias de 1980 a 2030 tendo como base o cenário referência [2]

Perante este cenário, o desperdício de energia é algo que não deve ocorrer, principalmente durante o consumo.

Nesta fase, a eficiência energética é frequentemente associada ao termo “Utilização Racional da Energia” (URE), que pressupõe a adopção de medidas que permitem uma melhor utilização da energia, tanto no sector doméstico, como no sector de serviços e industrial.

Por meio da escolha, aquisição e utilização adequada dos equipamentos, é possível alcançar poupanças significativas de energia, manter o conforto e aumentar a produtividade das actividades dependentes de energia, com vantagens do ponto de vista económico e ambiental.

Durante a fase de transformação da energia, a eficiência energética depende de um número restrito de factores, contudo, no momento do consumo, depende de todos nós.

Relativamente à energia eléctrica consumida em Portugal, importa realçar que 32% desta energia foi consumida pelos edifícios (2004) conforme indica a figura 1.2.

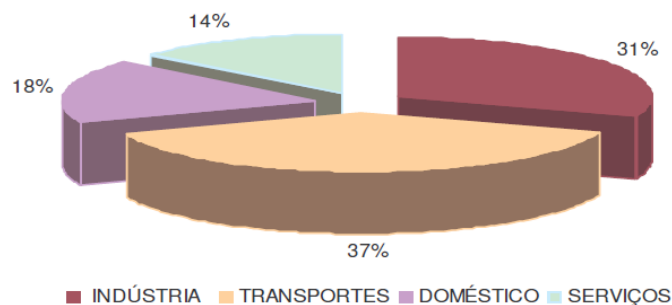


Figura 1.2 – Desagregação das fontes utilizadoras de energia final de Portugal em 2004 [3]

Com o intuito de cumprir o Protocolo de Quioto, a Comissão Europeia propôs, em 2001, acções sobre o rendimento energético nos edifícios.

Neste sentido, como o transporte vertical assume um papel de alguma relevância no consumo de energia, nomeadamente em edifícios de serviços, foram centradas atenções para as instalações de transporte vertical recentemente.

Apesar de existirem processos de certificação específicos para estas instalações, ainda que de carácter voluntário, falta criar uma metodologia internacional para análise destas instalações, à semelhança do que acontece em outros sistemas.

Neste sentido foi criado um grupo de estudo, no âmbito do projecto E4, para avaliar o desempenho energético das instalações de transporte vertical existentes.

Na Europa (EU-25) existem cerca de 4 milhões de elevadores. O âmbito do Projecto E4 é caracterizar os sistemas de transporte de pessoas (elevadores e escadas rolantes) em termos de consumo de electricidade e as tecnologias existentes no sector terciário e em edifícios residenciais da União Europeia. Este projecto visa também promover a utilização eficiente da energia neste tipo de instalações através da aplicação das tecnologias disponíveis ou emergentes no mercado.

As novas tecnologias e práticas, nomeadamente ao nível dos motores e accionamentos, conversores regenerativos, software de monitorização, optimização dos contrapesos, iluminação e ventilação da cabina e tecnologias hidráulicas mais eficientes podem produzir poupanças significativas.

Neste relatório são analisadas algumas destas tecnologias, tendo sido efectuado também um estudo prático num centro comercial do Porto onde foram monitorizadas duas instalações de escadas rolantes, de modo a tentar avaliar o potencial de intervenção nas mesmas com vista à melhoria da eficiência energética.

1.2. Estrutura do relatório

Este documento está estruturado em 7 capítulos, apresentando-se em seguida uma breve descrição de cada um:

Capítulo 1 – Contém uma pequena introdução do panorama energético mundial, alertando para a necessidade de otimizar o consumo de energia.

Capítulo 2 – São efectuadas algumas considerações sobre a eficiência dos motores eléctricos, referenciando a nova classificação energética internacional. Explicação breve dos motores de indução e dos novos motores síncronos de ímanes permanentes usados na indústria do transporte vertical.

Capítulo 3 - Apresenta os diversos tipos de sistemas de transporte vertical existentes e alguns dos seus componentes, bem como os diferentes tipos de controlo.

Capítulo 4 – É analisada a norma internacional que avalia o desempenho das instalações de transporte vertical, sendo também apresentada a classificação energética voluntária actualmente em vigor na Alemanha (VDI 4707), uma das directrizes para a classificação energética internacional futura.

4 Introdução

Capítulo 5 – Apresentação do dispositivo de monitorização de tráfego desenvolvido para o caso de estudo.

Capítulo 6 – Caso de estudo, onde são apresentados os procedimentos de teste e análise e tratamento de resultados.

Capítulo 7 - Principais conclusões do relatório e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Considerações sobre os motores eléctricos usados em transporte vertical

A indústria do transporte vertical necessita de motores eléctricos para o seu funcionamento. Os motores utilizados nesta indústria devem ser projectados para regimes de funcionamento severos e possuir uma entrega de binário suave, promovendo o conforto dos passageiros. O ciclo destes motores deve contemplar uma fase de aceleração, outra de velocidade constante e uma fase de desaceleração.

Importa ainda dizer que nesta indústria existe um certo compromisso entre fabricantes e marcas, sendo difícil a entrada de componentes de outras marcas.

2.1. Eficiência em motores eléctricos

A eficiência de um motor é a relação entre a quantidade de trabalho produzido e a quantidade de energia consumida.

Num mundo ideal, os motores eléctricos deveriam trabalhar com uma eficiência de 100%, ou seja, cada quilowatt de potência entregue aos terminais do motor seria convertido em trabalho útil no eixo do motor.

No entanto, no mundo real, não é isto que acontece. No processo de funcionamento dos motores eléctricos existem perdas significativas originadas por diversas fontes, conforme está descrito nas normas NEMA MG1 e IEEE Std112.

Na norma NEMA MG1 estão definidos os requisitos de desempenho em geral, enquanto que na IEEE Std112 estão referidas as perdas que determinam a eficiência nominal de um motor em particular, abrangido pela NEMA MG1. A IEEE Std112 descreve também os procedimentos de medida e de teste dos motores de modo a obter informação comparativa, bem como as margens de tolerância.

Depois da NEMA ter lançado as especificações gerais: *NEMA Premium® Efficiency Electric Motors (600 Volts or Less)* em 2003, a maior parte dos fabricantes reuniu esforços para cumprir ou até mesmo exceder os requisitos de eficiência NEMA Premium®. O propósito desta especificação foi reunir os requisitos mínimos para os motores de indução trifásicos rotulados

com a etiqueta *Premium®*, instalados em aplicações industriais e comerciais, funcionando a uma tensão de 600 volt ou inferior, com potências não superiores a 500 HP e que operem mais de 2000 horas por ano a 75% da carga máxima.

As perdas num motor de indução são calculadas como sendo a diferença entre as potências de entrada e saída, podendo ser classificadas em cinco categorias: [5]

- Perdas no ferro: perdas magnéticas nas laminações do núcleo, histerese e correntes parasitas de Foucault, referidas como P_{Fe} ;
- Perdas mecânicas: perdas por atrito no sistema de transmissão e ventilação, P_{Mech} ;
- Perdas no estator I^2R : perdas joule¹ devidas à circulação de corrente nos enrolamentos do estator, $P_{Cu,s}$;
- Perdas no rotor I^2R : perdas joule devidas à circulação de corrente nas barras e anéis rotor, que dependem do material, da secção e do comprimento do mesmo, $P_{Cu,r}$;
- Perdas adicionais: são devidas às imperfeições na distribuição dos fluxos magnéticos e de corrente, podendo ser reduzidas com um bom projecto do motor, P_{Add} .

A proporção relativa destes cinco tipos de perdas, num motor de indução, depende da potência do mesmo, como se pode verificar na figura 2.1.

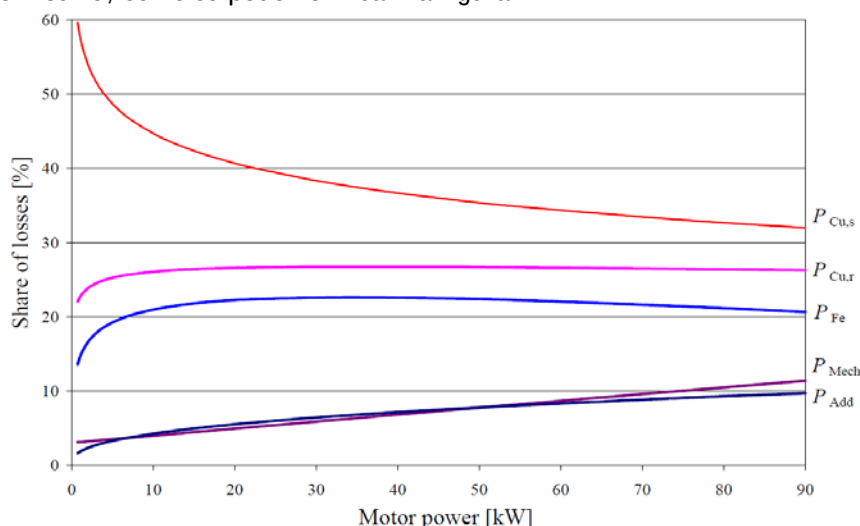


Figura 2.1 - Distribuição de perdas nos motores de indução de 4 pólos com rotor em gaiola de esquilo, totalmente fechados e com arrefecimento por ventoinha (TEFC) em função da potência do motor. (Auinger 1997; Haataja 2003)

Conhecendo os factores que influenciam a eficiência de um motor, podem ser desenvolvidos em conformidade métodos para a melhoria da eficiência.

Um trabalho recente de investigação, efectuada por *Fuchsloch et al* [6] permitiu identificar claramente as áreas de melhoria (fig. 2.2). Esta equipa estudou os diversos factores que afectam a eficiência e também o modo como estes influenciam o desempenho do motor. Contudo, é preciso ter em conta o impacto comercial e ambiental proveniente da intervenção nestas áreas.

¹ O efeito joule corresponde ao aquecimento de um condutor quando este é atravessado por uma corrente eléctrica.

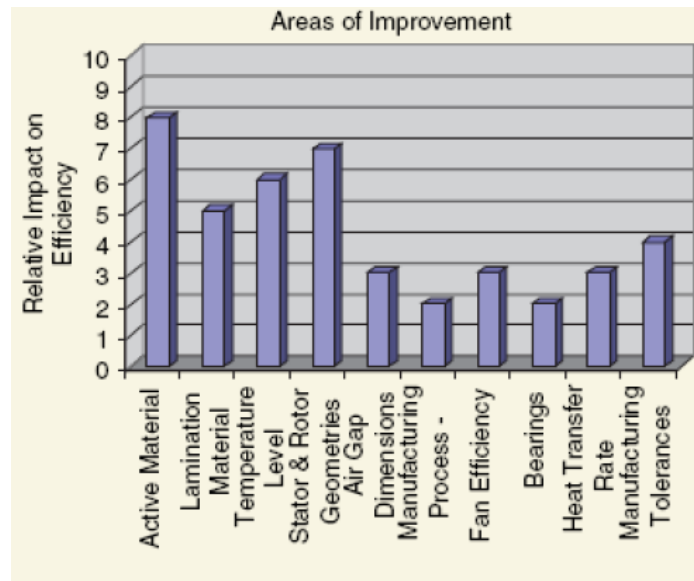


Figura 2.2 - Impacto relativo das diferentes áreas de melhoria na eficiência dos motores [6]

Com o aparecimento das ferramentas de análise computacional, o efeito da intervenção nas diferentes áreas pode ser avaliado, através de simulação.

Contudo, algumas destas áreas implicam custos elevados, como por exemplo, o uso de materiais laminados de alto desempenho.

Existem também algumas áreas menos previsíveis, estando fora do controlo dos engenheiros de projecto, como é o caso das propriedades dos materiais usados na construção dos motores.

A recente descoberta dos ímanes permanentes de neodímio, ferro e boro (NdFeB), contribuiu imenso para o desenvolvimento dos novos motores síncronos de ímanes permanentes (PMSM), tornando possível a substituição das máquinas de indução em algumas aplicações. Por outro lado, a optimização das geometrias do estator e do rotor, bem como as dimensões do entreferro, são medidas que dependem exclusivamente da engenharia, não estando associadas a outros factores.

No passado, o projecto geométrico dos motores era efectuado por tentativa e erro, hoje em dia, com as ferramentas computacionais existentes de projecto e simulação, é possível prever o desempenho das diversas soluções, antes da fase de concepção do protótipo, o que reduz significativamente os custos.

2.1.1. Classificação internacional de eficiência para os motores eléctricos (IEC 60034-30)

As novas tecnologias emergentes transportam os níveis de eficiência para patamares superiores. Contudo, até agora não existia uma norma internacional que contemplasse o nível "*Super Premium Efficiency*". Além disso, estão implementadas diversas normas de eficiência energética relativas aos motores de indução de gaiola de esquilo, o que torna difícil para os fabricantes classificar os motores de maneira universal. Sendo os motores concebidos para

8 Considerações sobre os motores eléctricos usados em transporte vertical

um mercado global, o cliente comum tem dificuldade em entender as diferenças e semelhanças das normas dos diferentes países.

Assim sendo, a Comissão Electrotécnica Internacional (IEC) apresentou um projecto internacional para um novo sistema de classificação IEC 60034-30, que contempla o novo nível de eficiência *Super Premium*.

A norma IEC 60034-30 (ed. 1.0) contempla quatro classes de eficiência distintas, apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 — Correspondência das diversas normas existentes com a IEC 60034-30 [7].

Níveis de Eficiência	IEC 60034-30 (Ed. 1.0)	Correspondente às normas	
		50 Hz	60 Hz
<i>Super Premium Efficiency</i>	IE4	redução de 15% das perdas relativamente a IE3	
<i>Premium Efficiency</i>	IE3	15%~20% de redução nas perdas relativamente a IE2	<i>US American NEMA Premium</i>
<i>High Efficiency</i>	IE2	CEMEP-EU eff1	<i>US American EPCAct</i>
<i>Standard Efficiency</i>	IE1	CEMEP-EU eff2	<i>Brazilian regulations</i>

Esta classificação abrange os motores de indução com potências entre os 0,75 kW e os 370 kW, que operem com tensões superiores a 1000 V com 2, 4 e 6 pólos, para frequências de 50Hz e 60Hz e em regime de funcionamento contínuo (S1).

As classes IE1, IE2 e IE3 são normativas, enquanto que a classe mais elevada (IE4) é informativa.

Os padrões de teste são baseados na norma IEC 60034-2-1, contemplando as perdas parasitas adicionais (*stray losses*), através de um método com baixo nível de incerteza.

Na figura 2.3 podemos ver que os valores de eficiência do nível IE4 estão compreendidos entre os 88% e os 97% estando o nível IE3 compreendido entre os 84% e os 96%, isto considerando sempre a mesma potência de saída.

Um aspecto que deve ser referido, é que os motores avançados IE4 podem requerer electrónica (conversores de frequência) para operar, e como a frequência da rede (50/60 Hz) e o número de pólos não estão directamente relacionados com a velocidade neste caso, estes motores são geralmente classificados como aptos para uma gama de velocidades e caracterizados por binário em vez de potência, conforme descrito na norma IEC 60034-30 ed. 1.0.

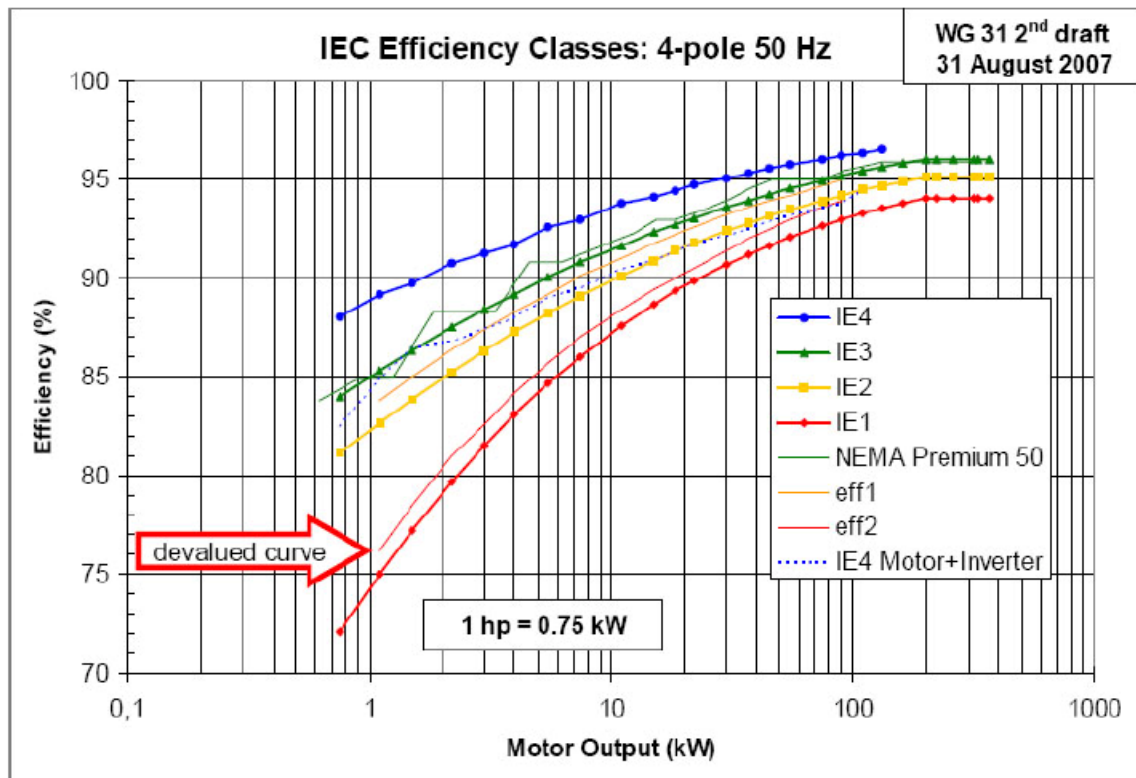


Figura 2.3 - Comparação dos vários níveis de eficiência pelo CEMEP [8]

Na figura 2.3 pode notar-se uma diferença de 1% entre as curvas IE1 e eff2, e entre IE2 e eff1.

Esta diferença deve-se ao novo método (norma IEC 60034-2-1) de determinação das perdas parasitas adicionais (*stray losses*) com base em teste, enquanto que pelo CEMEP estas perdas eram consideradas como sendo 0,5% da potência de entrada. Por isso, as curvas eff1 e eff2 devem ser desvalorizadas (*devalued curve*).

Na última edição da IEC 60034-30 (2008/04/30), o nível de eficiência IE4 é referenciado como tendo uma redução de 15% nas perdas relativamente a IE3.

Na figura 2.4 é apresentada uma comparação detalhada entre os níveis IE3 e IE4, aqueles que importarão num futuro preocupado com as questões energéticas.

A norma IEC 60034-30 indica também que serão necessárias outras tecnologias, que não a de indução em gaiola de esquilo, para alcançar o nível IE4 de eficiência. Assim, a norma terá de ser revista em conformidade de forma a englobar outras tecnologias como, por exemplo, a de ímanes permanentes.

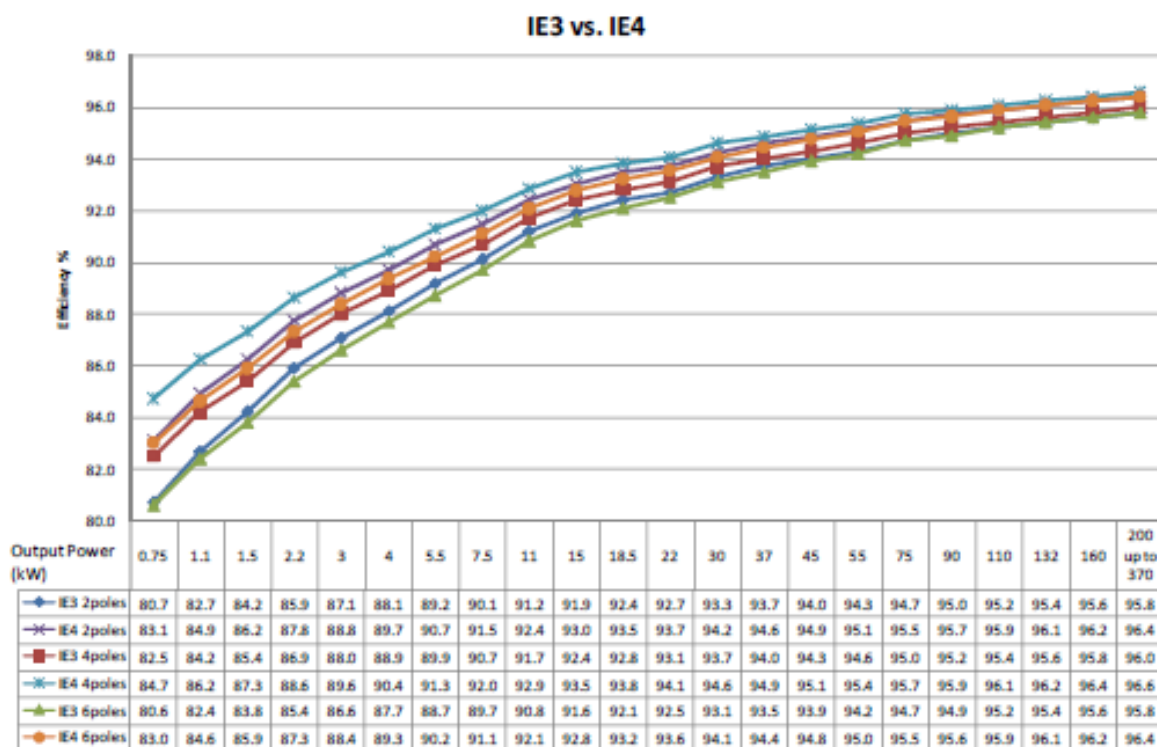


Figura 2.4 - Comparação dos níveis IE3 e IE4 para as várias potências de saída (de acordo com IEC 60034-30, subtraindo 15% das perdas relativamente a IE3) [9].

As melhorias significativas da eficiência podem ser atribuídas à adição de mais cobre nos enrolamentos, à melhoria do desenho dos circuitos laminados, à precisão do entreferro entre o estator e o rotor e à redução das perdas na ventilação.

Foram feitos também estudos por *Malinowski, McCormick e Dunn* [10], onde foram introduzidas novas pesquisas com vista a melhorar a eficiência, debruçando-se sobre novos desenhos e técnicas de laminação do aço.

A utilização de rotores de cobre com uma laminação optimizada, pode aumentar a eficiência de 1 a 2% quando comparado com a utilização de rotores em alumínio, reduzindo as perdas rotoricas, isto em relação a pequenos motores, reduzindo para 0,5% em grandes motores.

Outra questão que importa salientar é a redução de perdas nos enrolamentos, que é alcançada através da redução do diâmetro externo do ventilador, o que irá melhorar consideravelmente a eficiência do motor. No entanto, isto origina uma subida da temperatura nos enrolamentos, que vai aumentar a resistência dos mesmos, produzindo um aumento das perdas estatoricas.

Assim sendo, os projectistas devem sempre ter presente o equilíbrio entre as diversas perdas que ocorrem num motor, com vista a optimizar o desempenho global [11].

Os principais fabricantes de motores eléctricos (apresentados na tabela 1.2) pretendem alcançar níveis de eficiência superiores ao NEMA ® Premium, pretendendo inclusivé alguns deles, alcançar o nível Super Premium ou até mesmo superá-lo.

Fabricantes como a Baldor e outros alcançam os níveis de eficiência centrando os seus esforços na fase do projecto, enquanto que outros como a SEW ou a Siemens já se encontram na linha da frente.

Todavia, existem ainda fabricantes como a Leroy-Somer ou a WEG, que já possuem na sua gama motores com a nova tecnologia de ímanes permanentes, projectados para substituir os motores de indução em algumas áreas como, por exemplo, o transporte vertical.

Tabela 2.2 — Motores de alta eficiência dos principais fabricantes existentes no mercado.

Fabricante	Referência	Nível de Eficiência
ABB	M4BP	NEMA Premium®
Baldor	Super-E® Premium Efficiency	NEMA Premium®
Brook Crompton	WP Premium efficiency motor	EFF 1
Emerson	NEMA Premium® efficient motor	NEMA Premium®
General Electric	X\$D Ultra NEMA Premium Efficiency -TEFC	NEMA Premium®
Hyosung	Premium High Efficiency Motor	NEMA Premium®
Leeson	Premium Efficiency WATTSaver®	NEMA Premium®
Leroy-Somer	Dyneo-LSRPM series (Ímanes Permanentes)	excede EFF1
Rockwell	Não disponível	NEMA Premium®
SEW Eurodrive	DE DTE/DVE	excede NEMA Premium®
Siemens	Ultra Efficient (GP100/100A)	excede NEMA Premium®
Sterling Electric	Não disponível	NEMA Premium®
Teco	Global XPE series	NEMA Premium®
Toshiba	Premium FC-EQPIII XT	NEMA Premium®
WEG	Wmagnet (Ímanes Permanentes)	Excede NEMA Premium®

A Siemens, por exemplo, faz questão de destacar o uso de um rotor em cobre (exclusivo Siemens, de vanguarda, concepção em molde e injeção à pressão). Este facto leva a que os motores deste fabricante estejam na vanguarda, como é mostrado na figura 2.5.

Podemos também ver uma comparação entre alguns motores, nomeadamente um da ABB (método de ensaio IEC 60034-2-1) e outros dois (SEW e Siemens), cujo método de teste é desconhecido.

Nesta comparação são apresentados somente motores de 4 pólos.

É interessante constatar que alguns motores da Siemens excedem o nível IE4 (pontos assinalados na imagem 2.5 com setas).

ABB motors efficiency compared with SIEMENS & SEW motors

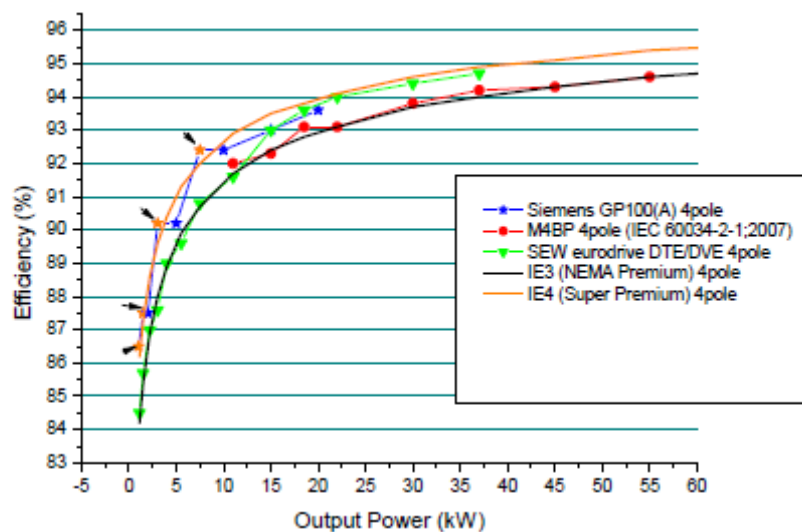


Figura 2.5 - Comparação de eficiência entre motores ABB, Siemens e SEW [12].

A superior eficiência dos motores da Siemens e SEW relativamente aos ABB poderá estar relacionada com a utilização de rotores em cobre por parte dos fabricantes alemães (Siemens e SEW).

À medida que os custos da energia sobem, determinadas tecnologias que implicavam custos elevados, começam a fazer sentido, sendo compensadas pela economia de energia.

Paralelamente, vão sendo desenvolvidas novas tecnologias de motores muito para além da típica construção em gaiola de esquilo.

Nas aplicações de pequeno porte, a tecnologia de ímanes permanentes pode mudar rapidamente a situação do mercado, pois tem requisitos de espaço bastante menores [13].

Para analisar os benefícios desta nova tecnologia, foram tomados como exemplo os motores do fabricante *Leroy-Somer* com as mesmas características dos motores de indução convencionais:

- Classe de isolamento IP 55 de acordo com a norma IEC 60034
- Potências entre 0.75 e 400 kW
- Binário entre 1 e 1400 Nm
- Velocidade entre 1 e 5500 min⁻¹
- Tamanho de carcaça entre 90 e 315 mm

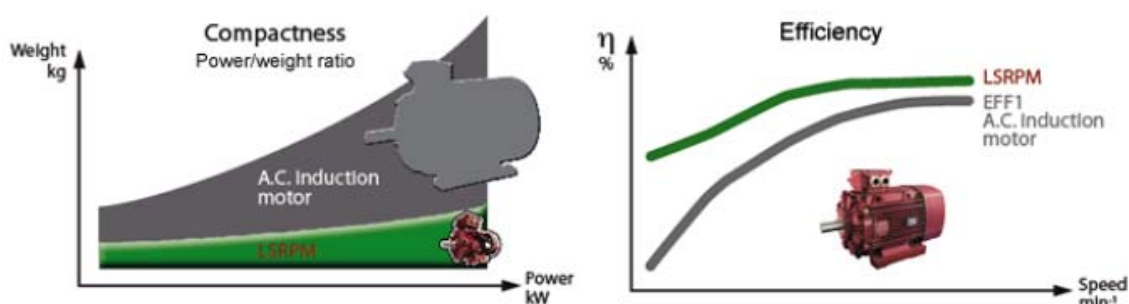


Figura 2.6 - Relação peso/potência e eficiência dos motores do fabricante *Leroy-Somer* série LSRPM (ímanes permanentes) [14].

Como se pode ver na figura 2.6, devido à tecnologia de ímanes permanentes com carcaça de alumínio, o motor é significativamente menor e mais leve comparativamente ao motor convencional de indução da mesma potência.

Além disso, como as perdas no rotor são reduzidas, pois neste tipo de tecnologia não há circulação de correntes no rotor, estes motores conseguem proporcionar níveis de eficiência superiores a EFF1.

Num motor, a conversão de energia é feita sobretudo no entreferro. O campo magnético no entreferro é criado pela combinação do campo criado pela circulação de corrente nos enrolamentos do rotor e do estator, ou pelos enrolamentos do estator e dos ímanes permanentes do rotor.

O campo magnético induz forças que produzem movimento no rotor.

Contudo, de acordo com a lei de Faraday, o campo magnético criado vai induzir força electromotriz nos enrolamentos, constituindo uma força contra electromotriz, que se opoe à tensão de entrada. Através do controlo da força contraelectromotriz, a corrente que circula no motor pode ser controlada.

Os motores eléctricos podem ser classificados consoante a potência nominal e o tipo de aplicação.

Nas instalações de transporte vertical actualmente são utilizados os motores de indução gaiola de esquilo e os motores síncronos de ímanes permanentes, que serão apresentados de seguida.

2.1.2. Motores de indução com rotor em gaiola de esquilo

Os motores de indução são máquinas assíncronas¹. Este tipo de motores são os mais utilizados no mundo, devido ao seu baixo custo e robustez, como se pode constatar pela figura 2.7.

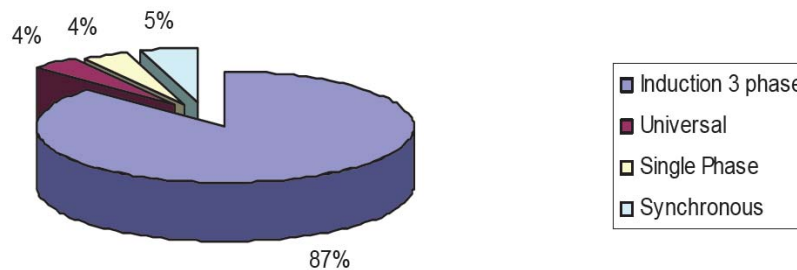


Figura 2.7 – Representação gráfica do tipo de motores AC existentes na EU-25 (2006) [15].

Estes motores podem ser ligados directamente à rede, não necessitando de conversores electrónicos para o seu funcionamento.

¹ Este tipo de máquinas roda ligeiramente abaixo da velocidade síncrona, uma vez que é necessário um desfazamento entre o rotor e o estator para induzir corrente no rotor, de modo a desenvolver binário motor.

Tradicionalmente, o motor de indução foi projectado para aplicações de velocidade constante. No entanto, com os avanços na tecnologia electrónica os motores de indução ganharam capacidade de regulação de binário e velocidade, passando a competir com os motores de corrente contínua.

O desenvolvimento da tecnologia de rotor em cobre (figura 2.8) permitiu que a posição do motor de indução no mercado continue ainda a ser dominante.



Figura 2.8 - Pormenor de um rotor em cobre [16].

Um motor de indução é composto basicamente por duas partes, o estator e o rotor. O espaço entre o estator e o rotor é denominado entreferro. O estator constitui a parte estática e o rotor a parte móvel. O estator é composto por chapas finas de aço magnético tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas de forma a alojar os enrolamentos, que por sua vez criam um campo magnético no estator.

No motor de indução gaiola de esquilo, representado na figura 2.9, o rotor é composto por barras de material condutor que se localizam à volta do conjunto de chapas do rotor, curto-circuitadas por anéis metálicos nas extremidades.

O motor de indução é o motor de construção mais simples. O estator e o rotor são montados solidários com um eixo comum aos “anéis” que os compõem. O estator é constituído por um enrolamento trifásico distribuído uniformemente em torno do corpo da máquina.

A aplicação de uma tensão alternada nos enrolamentos do estator irá produzir um campo magnético variante no tempo, que devido à distribuição uniforme do enrolamento do estator irá gerar um campo magnético resultante girante com uma velocidade proporcional à frequência da rede trifásica. O fluxo magnético girante no estator atravessará o entreferro e por ser variante no tempo induzirá uma tensão alternada no enrolamento trifásico do rotor. Como os enrolamentos do rotor estão curto circuitados, essa tensão induzida fará com que circule uma corrente pelo enrolamento do rotor o que por consequência irá produzir um fluxo magnético no rotor que tentará alinhar-se com o campo magnético girante do estator. Este tipo de motor quando atinge uma rotação acima da síncrona pode gerar potência activa e transmiti-la à rede.

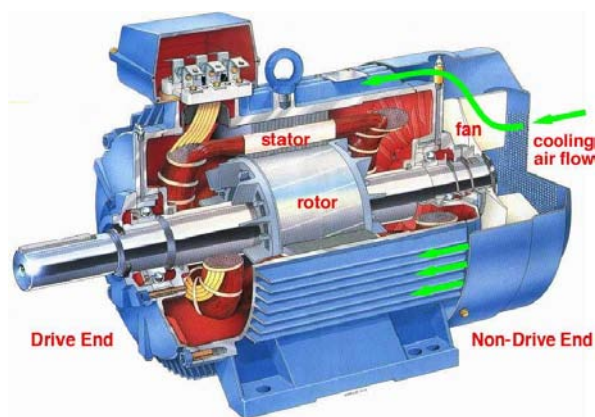


Figura 2.9 - Esquemático de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo [17]

2.3. Motores síncronos de ímanes permanentes (PMSM)

Os motores de ímanes permanentes são máquinas síncronas¹. O estator geralmente incorpora enrolamentos como nos motores de indução, no entanto, a diferença está no rotor que neste tipo de motores é composto por ímanes permanentes. Este facto permite que o rotor permaneça sempre magnetizado. Por outro lado, as perdas relacionadas com a circulação de corrente nos enrolamentos do rotor, que ocorrem no motor de indução, são praticamente inexistentes neste novo tipo de motores.

Os magnetes podem estar à superfície ou dentro do rotor. As diferentes geometrias existentes estão apresentadas na figura 2.10.

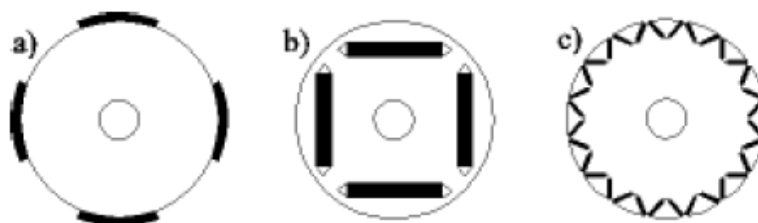


Figura 2.10 – Diferentes tipos de estruturas do rotor [18]

- a) Magnetes à superfície.
- b) Magnetes encastrados tangencialmente.
- c) Magnetes encastrados de forma especial (inclinados).

Quando o estator é energizado, cria um campo magnético girante que faz com que o rotor rode em sincronismo com ele.

Este tipo de motores necessita obrigatoriamente de um inversor para o seu funcionamento, uma vez que ligado directamente à rede não possui capacidade de arranque, pois as correntes que impulsionam o movimento têm de ser sincronizadas constantemente com a posição do rotor, daí a necessidade de um inversor com realimentação.

O uso de ímanes permanentes no rotor permite que as perdas rotoricas sejam eliminadas, uma vez que não circulam correntes no mesmo, como acontece nos motores de indução.

Além disso este tipo de motores gera muito menos calor, e possui baixa inércia, devido à ausência de enrolamentos no rotor.

A utilização destes motores em aplicações de velocidade variável, permite atingir níveis de eficiência superiores, na ordem dos 10 a 15%, para além de possibilitar uma eficiência de funcionamento de cerca de 90% [19]

¹ Uma máquina síncrona roda à velocidade de sincronismo, produzindo binário nesta velocidade.

2.1.4. Considerações sobre o factor de potência

A potência eléctrica num circuito de corrente alternada tem três componentes:

- Potência activa (P)
- Potência reactiva (Q)
- Potência aparente (S)

A potência activa corresponde ao trabalho útil produzido, medida em watts (W).

A potência reactiva, apesar de não produzir trabalho útil é necessária para a operação de alguns equipamentos, sendo responsável pela produção do campo eléctrico e magnético. É medida em volts-ampere - reactivos (var). A corrente de magnetização necessária para o funcionamento dos motores de indução cria potência reactiva.

A potência aparente corresponde à soma vectorial da potência activa com a potência reactiva, sendo medida em volt-ampere.

O factor de potência, também designado por $\cos \varphi$, corresponde ao ângulo de desfazamento (φ) entre a tensão (V) e a corrente (I), representado na figura 2.11.

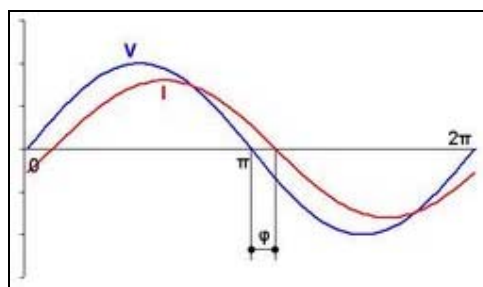


Figura 2.11 - Desfazamento entre a tensão (V) e a corrente (I) num circuito de corrente alternada [21]

Por definição, o factor de potência é um número adimensional que varia entre 0 e 1, que pode ser calculado através da equação 2.1

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.1)$$

O factor de potência e a eficiência dos motores de indução estão de certa maneira relacionados, sendo dependentes do factor de carga, que corresponde ao rácio entre a carga do motor e o total de carga mecânica para que o motor foi concebido (figura 2.12).

Quando o motor trabalha com a tensão nominal e regime de carga parcial, a eficiência deste pode ser muito baixa, na ordem dos 20%. Reduzindo a tensão de funcionamento as perdas no ferro do motor são reduzidas, uma vez que são proporcionais à raiz quadrada da tensão aplicada. Por outro lado o factor de potência também é melhorado, reduzindo as perdas no cobre do motor.

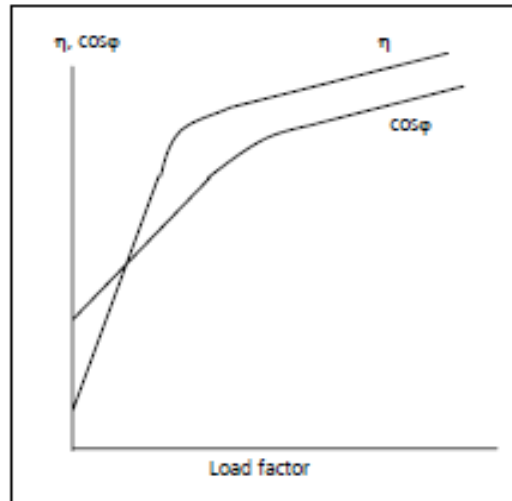


Figura 2.12 - Variação do rendimento e do factor de potência com o regime de carga num motor de indução com rotor em gaiola de esquilo [21]

Uma das grandes vantagens do novo tipo de motores síncronos de ímanes permanentes está relacionada com a magnetização permanente deste tipo de motores. Ao contrário das máquinas de indução, onde a magnetização do rotor é efectuada a partir do estator, nos motores de ímanes permanentes a magnetização é promovida pelos magnetes.

Assim sendo, a eficiência em regime parcial de carga é muito melhor nos motores de ímanes permanentes do que nas máquinas de indução, facto que pode ser constatado pelo factor de potência (figura 2.13).

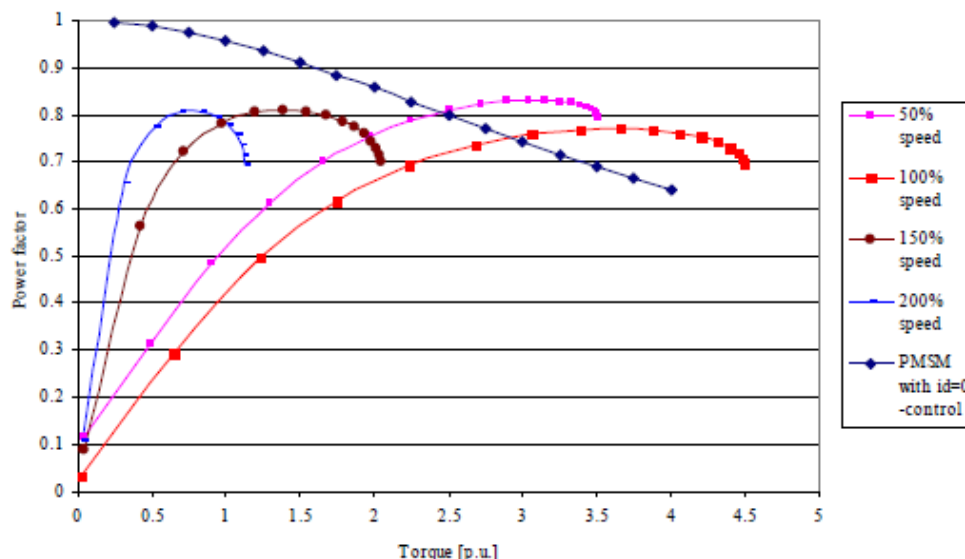


Figura 2.13 - Factores de potência em função do binário para as diferentes velocidades relativas de um motor de indução protótipo. Representação do factor de potência de um motor de ímanes permanentes com controlo por corrente mínima em função do binário. [22]

Capítulo 3

Sistemas de transporte vertical

Nos edifícios modernos, o transporte vertical assume, cada vez mais, o papel preponderante de garantir a circulação eficiente de todos os potenciais ocupantes do edifício.

Essa eficiência é alcançada através da implementação de elevadores de passageiros com capacidade e desempenho adequados, bem como elevadores adicionais que promovam o transporte de cargas, o serviço de bombeiros ou outras funções relativas ao edifício. [23]

Neste capítulo são apresentados alguns dos sistemas de transporte vertical existentes, bem como alguns dos componentes que os constituem.

3.1. Elevadores

3.1.1. Elevadores de tracção eléctrica

Os elevadores tradicionais de tracção eléctrica são adequados para o transporte de passageiros, não tendo limitações significativas ao nível da lotação de passageiros, distância máxima de viagem ou velocidade.

As velocidades permitidas podem variar entre 0,25 m/s e 17 m/s. No entanto, a gama preferencial de velocidades situa-se entre 1 m/s e 6 m/s. [23]

Com a evolução da tecnologia, nomeadamente com o aparecimento dos sistemas de controlo realimentados, é garantida uma precisão bastante elevada nos nivelamentos aos pisos.

Os accionamentos de uma e duas velocidades, estão a ser modernizados por sistemas de velocidade variável, estando os sistemas de corrente contínua já praticamente obsoletos e, por isso, não devem ser considerados actualmente.

Os modernos controladores que utilizam variadores de tensão e frequência (VVVF), são actualmente os mais indicados, promovendo a eficiência energética e um controlo preciso.

Esta tecnologia, associada à utilização dos novos motores síncronos de ímanes permanentes *gearless*¹, assegura um elevado nível de eficiência em termos energéticos.

As limitações dos elevadores de tracção eléctrica são reduzidas, estando relacionadas fundamentalmente com requisitos ao nível de espaço e altura para uma casa de máquinas, requisitos estes que actualmente são anulados com os novos sistemas sem casa de máquinas (MRL), como se pode constatar na figura 3.1.

Os elevadores de tracção são sistemas equilibrados através de um contrapeso comandado por uma ou mais polias, podendo originar cargas demasiado elevadas na estrutura superior do edifício, o que também poderá causar algumas limitações.

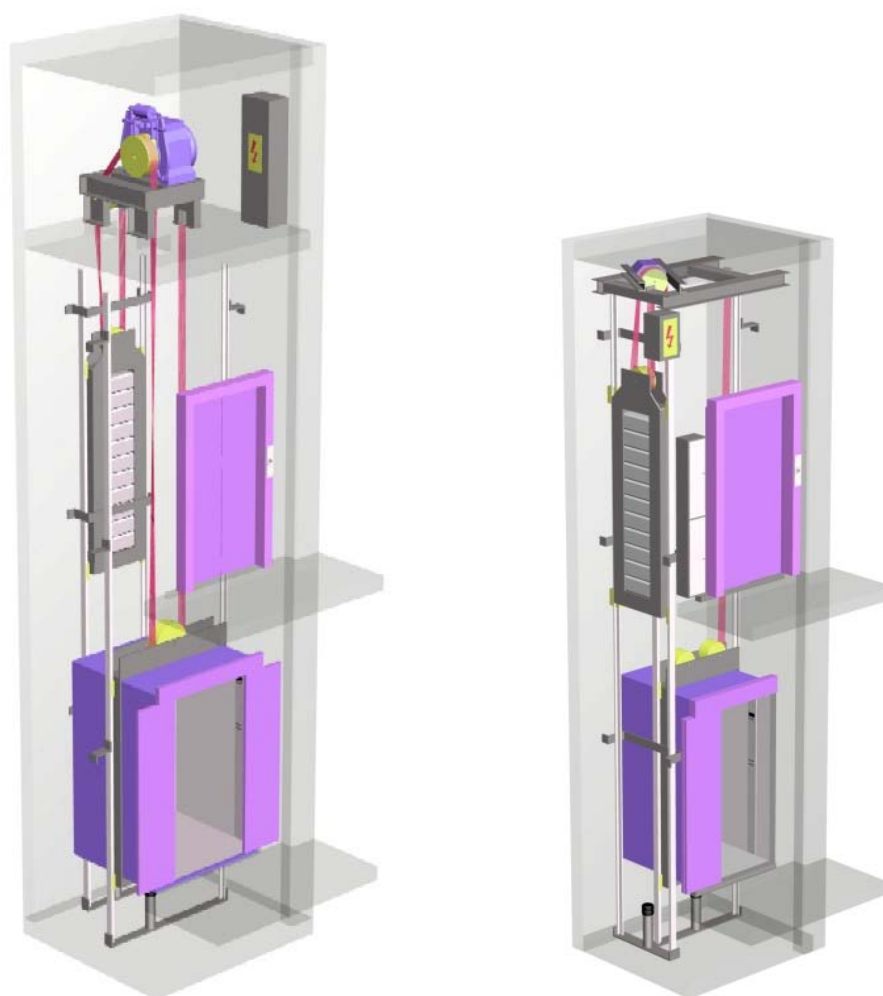


Figura 3.1 – Esquemático de um elevador com casa de máquinas (à esquerda) [24] e outro sem casa de máquinas (à direita) [25].

¹ Sem caixa de engrenagens

3.1.2. Elevadores hidráulicos

Os elevadores do tipo hidráulico, estão vocacionados para instalações que não necessitem de grandes requisitos ao nível de velocidade, que tipicamente nestes sistemas é de 0,63 m/s, apesar de alguns fabricantes garantirem velocidades de 1 m/s. [23]

No entanto, a maior limitação desta tecnologia é a distância máxima de viagem, que dificilmente ultrapassa os 18 metros.

A eficiência energética destes sistemas é relativamente fraca, devido à ausência de equilíbrio por contrapeso. As temperaturas elevadas registadas nestes sistemas constataam este facto, sendo mesmo necessária refrigeração adicional a partir dos 45 arranques por hora.

Apesar deste facto, esta tecnologia oferece vantagens em sistemas que tenham pouco tráfego e que operem com cargas elevadas como, por exemplo, alguns monta-cargas, pois as forças em jogo no processo de movimentação da carga são menos severas para a estrutura do edifício, sendo suportadas maioritariamente pelas fundações do edifício. Em edifícios antigos, onde originalmente não tinha sido prevista uma instalação de transporte vertical devido a restrições estruturais ou de altura do edifício, a única tecnologia passível de aplicar é a hidráulica.



Figura 3.2 – Esquemático de um elevador do tipo hidráulico [26]

3.1.3. Casa de máquinas

A casa de máquinas de uma instalação deve ter controlo de temperatura através de ventilação e aquecimento.

Nos elevadores de tracção eléctrica, a casa das máquinas deve ser colocada preferencialmente no topo da instalação. Existe também a possibilidade da mesma ser montada nas laterais ou no fundo da instalação, no entanto, nestes casos os custos inerentes deste tipo de montagens são elevados, pois obrigam a configurações complexas ao nível do sistema tractor, diminuindo também a vida útil dos cabos de tracção, que estão sujeitos a curvaturas maiores.

Nos elevadores hidráulicos, a casa de máquinas deve ser adjacente ao elevador no patamar inferior, no entanto, existe alguma flexibilidade na sua localização.

Contudo, se for necessária uma localização diferente, deve ser garantida uma distância não superior a 6 metros entre a casa de máquinas e o macaco hidráulico.

O controlo de temperatura da casa de máquinas de um sistema hidráulico é mais exigente, devido às altas temperaturas originadas pelo funcionamento do elevador.

3.1.4. Contrapeso

Os elevadores de tracção eléctrica usam um contrapeso para equilibrar o sistema. O valor normalmente usado para o contrapeso corresponde a 50% do peso bruto que é movimentado (cabine do elevador lotada).

Assim sendo, o motor só tem de suportar, no pior caso, 50% da carga.

Contudo, este valor de contrapeso poderá ser algo elevado uma vez que são raras as vezes que uma cabina de elevador circula completamente lotada, não aproveitando assim o dimensionamento do contrapeso, obrigando a que nas situações de descida da cabina vazia se mova uma grande massa de contrapeso.

Esta situação já foi prevista por alguns fabricantes, que começaram a dimensionar sistemas contrabalançados a 40%.

A potência necessária de saída do motor eléctrico tractor (P) com uma eficiência (η) está relacionada com a carga máxima em desequilíbrio (B) e a velocidade nominal (v) pela seguinte equação: [27]

$$P = 0.981 \times \frac{B \times v}{\eta} \quad (3.1)$$

De acordo com a equação 3.1, se a carga em desequilíbrio duplicar, então a velocidade do motor tem de ser metade, para que o motor continue a trabalhar à potência nominal.

Assim, a velocidade do motor deve ser ajustada em função da lotação da cabina, de modo a que a equação seja sempre satisfeita.

Deste modo é possível dimensionar contrapesos menores reduzindo assim o consumo de energia nas situações em que o contrapeso é elevado.

Portanto, o dimensionamento do contrapeso deve ser objecto de uma análise cuidada. O seu dimensionamento correcto pode influenciar bastante o consumo de energia, além de permitir a instalação de um motor com menor potência, o que trará vantagens a nível de custos e espaço.

3.1.5. Tipos de comando existentes

Existem tecnologias para o controlo dos motores alimentados em corrente contínua (CC) e tecnologias para o controlo dos motores alimentados em corrente alternada (CA).

Actualmente os motores de corrente contínua deixaram de ser utilizados nas aplicações de elevação de carga, pois são bastante exigentes ao nível da manutenção devido aos seus aspectos construtivos (desgaste das escovas e do colectore) além de terem um custo superior relativamente aos motores de corrente alternada.

Existe ainda um outro tipo de motores, os síncronos de ímanes permanentes (referenciados no capítulo 2), que têm de estar necessariamente acoplados a um sistema de comando composto por um variador de tensão e frequência próprio.

3.1.5.1. Ward-Leonard (M-G)

Este tipo de comando foi introduzido em 1891 por *Harry Ward Leonard*. O princípio fundamental deste tipo de controlo consiste na variação da tensão no rotor e não da resistência, como era feito até então, causando um desperdício de energia e um controlo instável. Desta maneira era ainda possível obter um binário eficaz e uma regulação suave de velocidade. [28]

Contudo, neste tipo de comando, verificam-se elevadas perdas mecânicas associadas ao acoplamento motor-gerador (M-G), para além de ser um sistema algo volumoso.

Ao longo dos anos foram surgindo algumas variantes deste tipo de controlo, nomeadamente sistemas com controlo de malha fechada, aparecendo posteriormente conversores estáticos com controlo de campo ou campo fixo.

Na figura 3.3 é apresentado um esquema deste tipo de controlo:

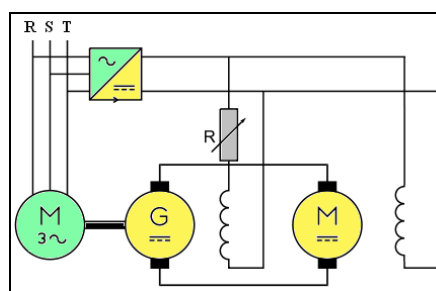


Figura 3.3 – Esquema do tipo de comando Ward-Leonard

3.1.5.2. Silicon-Controlled Rectifier (SCR)

Com o desenvolvimento da electrónica de potência, o accionamento mecânico motor-gerador na tecnologia anterior, foi substituído por uma ponte de tirístores, eliminando assim as desvantagens mecânicas do sistema anterior. Este tipo de comando funciona nos 4 quadrantes, o que permite operações de arranque e travagem em ambas as direcções, normal e inversa (figura 3.4).

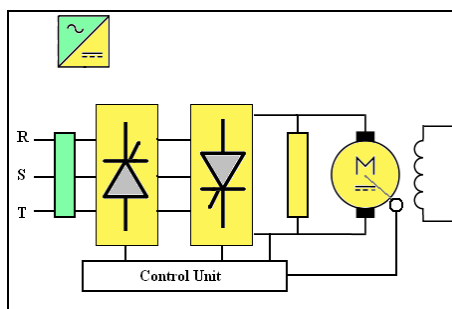


Figura 3.4 – Esquema do tipo de comando *Silicon-Controlled Rectifier* (SCR)

3.1.5.3. Controlo de tensão (ACVV)

Este tipo de controlo comanda o motor através da variação da tensão. Como o binário do motor depende da tensão aplicada, um controlo deste tipo origina pouca controlabilidade e instabilidade a baixas velocidades.

A travagem nestes casos é proporcionada pela injeção de corrente contínua ou tensão no enrolamento de baixa velocidade, o que pode causar um grande aquecimento nos enrolamentos do motor (figura 3.5).

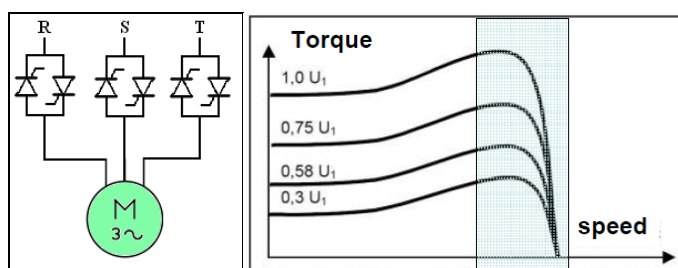


Figura 3.5 – Esquema do tipo de comando por variação de tensão (ACVV) e característica de binário/velocidade deste tipo de controlo. [29]

3.1.5.4. Controlo de tensão e frequência (VVVF)

Este tipo de tecnologia é actualmente a que oferece mais vantagens. Promove um controlo eficaz do motor variando a tensão e frequência para que o mesmo trabalhe sempre no regime óptimo de binário independentemente da velocidade.

As correntes de arranque são optimizadas e o factor de potência é melhorado.

Para ter capacidade de regeneração de energia é necessário instalar um rectificador em anti-paralelo (figura 3.6).

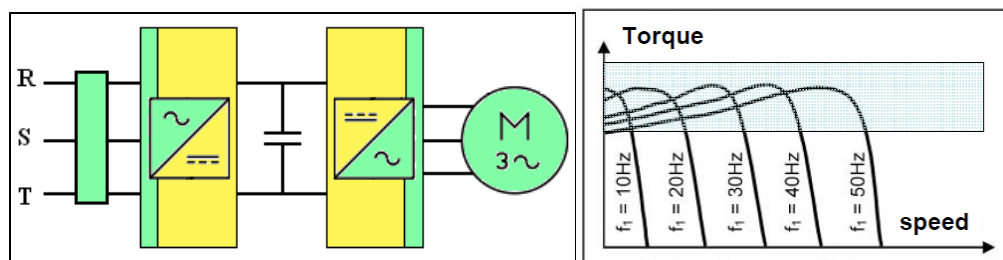


Figura 3.6 – Esquema do tipo de comando por variação de tensão e frequência (VVVF) e característica de binário/velocidade deste tipo de controlo. [29]

Na tabela 3.1 são apresentados os tipos de controlo que possuem capacidade de regeneração de energia.

Tabela 3.1 — Capacidade de regeneração dos vários tipos de comando existentes [30].

Tipo de comando	Descrição
Ward-Leonard Capacidade de regeneração: Sim	A regeneração de energia é alcançada naturalmente, o gerador torna-se no motor e o motor passa a ser o gerador.
Duas-velocidades Capacidade de regeneração: Sim	A regeneração de energia é possível devido à ligação directa à rede
Controlo de tensão (ACVV) Capacidade de regeneração: Não	A energia regenerada é dissipada nos enrolamentos do motor ou no rotor no processo de travagem.
Variador de tensão e frequência (VVVF) Capacidade de regeneração: Não	No processo de regeneração de energia, o calor é dissipado em resistências de travagem
Variador de tensão e frequência (VVVF) Capacidade de regeneração: Sim	Só é possível entregar a energia regenerada à rede se for instalada uma unidade especial que permita o funcionamento nos 4 quadrantes.

Dollard *et al* [31], efectuou um estudo comparativo entre os vários tipos de controlo existentes relativamente ao consumo de energia. Para isso fez medições em cerca de 30 instalações, baseadas numa viagem ascendente e descendente entre 3 pisos. Os resultados são apresentados na figura 3.7.

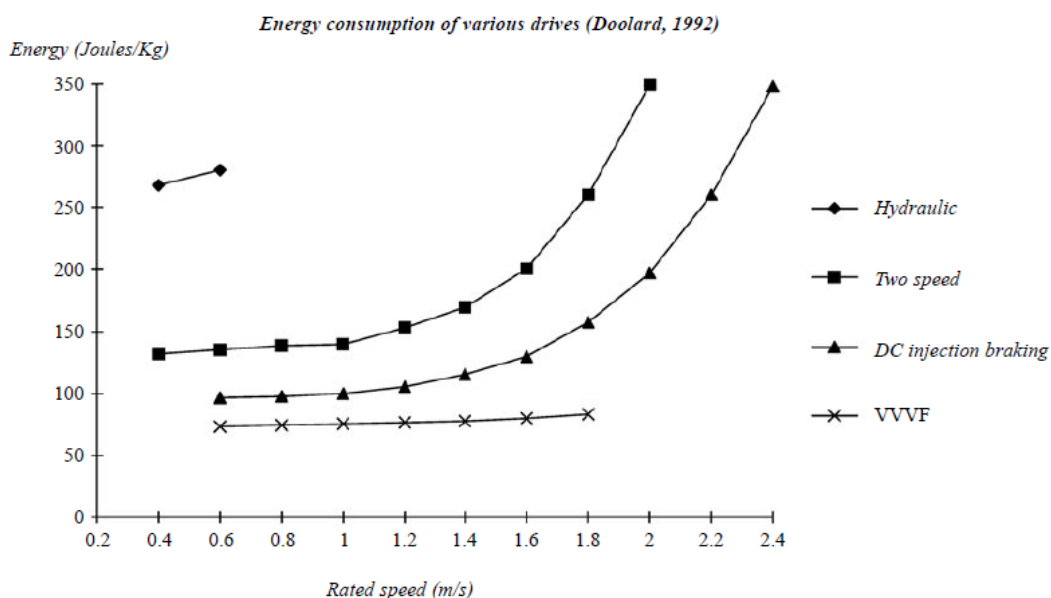


Figura 3.7 – Gráfico comparativo dos diferentes tipos de controlo existentes relativamente ao consumo de energia [32].

A figura 3.7 revela que os elevadores de comando hidráulico são sempre menos eficientes que os equivalentes de tracção eléctrica. Os elevadores controlados por variador de tensão e frequência (VVVF) correspondem aos mais eficientes.

Importa referir que no momento deste estudo (1992), a tecnologia hidráulica ainda era a convencional. Contudo, existem novos sistemas no mercado capazes de recuperar energia no processo de descida, através de um acumulador de pressão. A tecnologia hidráulica tem sofrido algumas inovações nos últimos anos com vista a melhorar o seu desempenho energético, apesar de ainda não conseguir superar os elevadores de tracção eléctrica nesse campo.

3.2. Escadas e tapetes rolantes

As escadas e os tapetes rolantes são normalmente utilizados para assegurar o movimento entre pisos adjacentes. A localização destes sistemas deve ser algures no caminho de circulação óbvia de pessoas, de forma a facilitar a entrada a bordo.

Os tapetes rolantes são usados para situações especiais, onde seja necessário, por exemplo, transportar carrinhos de compras ou carrinhos de bebé, situações em que as escadas rolantes não podem satisfazer as necessidades.

As escadas rolantes operam a uma velocidade nominal de 0,5 m/s, podendo em alguns casos ascender para os 0,65 m/s.

As inclinações permitidas são de 30°, podendo chegar aos 35° se o desnível for inferior a 6 metros e a velocidade menor que 0,5 m/s.

Os tapetes rolantes trabalham a velocidades de 0,5 m/s, podendo alcançar em algumas situações os 0,75 m/s. As inclinações possíveis variam entre os 0 e os 12°.

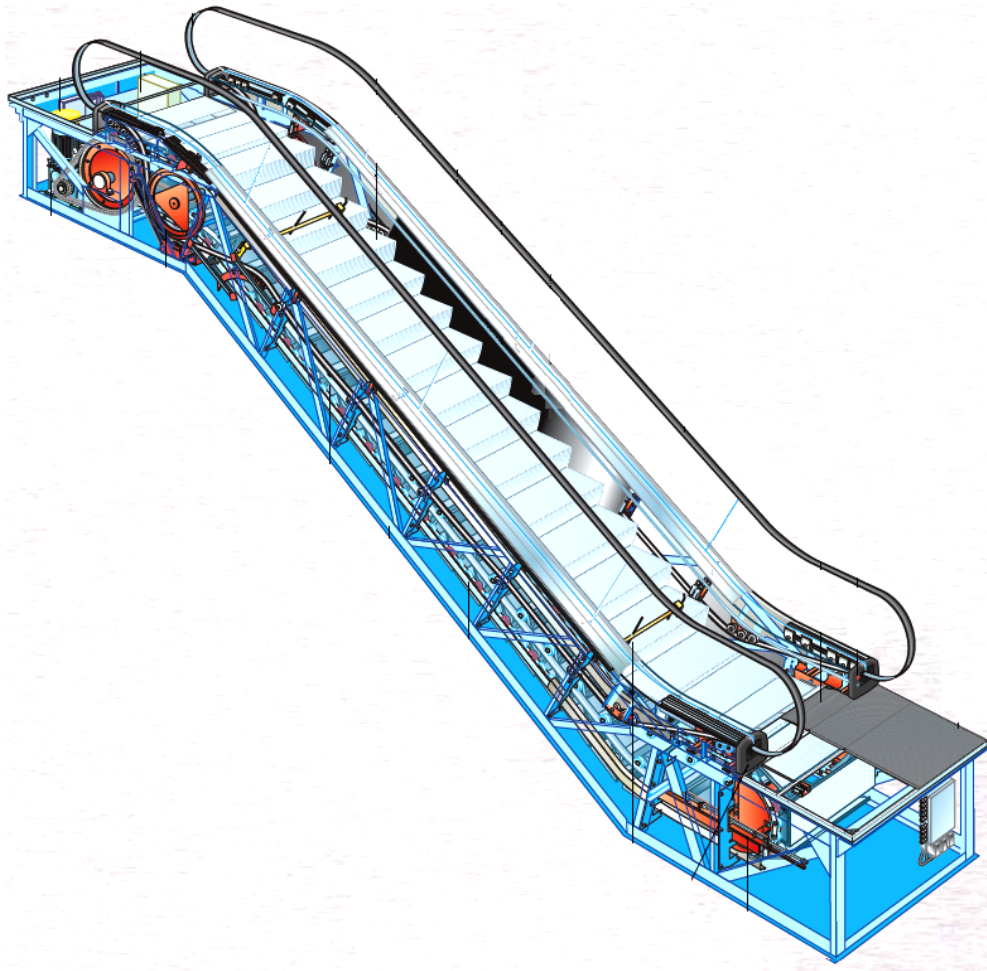


Figura 3.8 – Esquemático de uma escada rolante [33].

3.2.1. Dimensionamento do motor

A potência necessária no motor de tracção de um sistema de escadas ou tapetes rolantes depende de diversos factores, tais como:

- o desnível da escada rolante ou comprimento do tapete rolante;
- a eficiência do sistema de transmissão da escada ou do tapete rolante;
- a eficiência da caixa de transmissão;
- a velocidade de operação;
- o ângulo de inclinação da escada ou do tapete;
- o número de passageiros em cada degrau (estimativa);
- o desnível de cada degrau.

Para uma instalação de escadas rolantes, a potência necessária de saída (P) em kW necessária para o motor é dada pela equação 3.2: [23]

$$P = \frac{\left(v \cdot m \cdot g \cdot n \cdot \left(\frac{R_e}{R_s} \right) \cdot \sin \theta \right) + p_h}{\eta_s \cdot \eta_g \times 1000} \quad (3.2)$$

Onde:

P= potência nominal do motor	(kW)
v=velocidade nominal	(m/s)
m=peso médio passageiros	(kg)
g=aceleração gravidade	(9,81 m/s ²)
n=número de passageiros médio	
R _e = desnível da instalação	(m)
R _s =desnível degraus	(m)
θ=inclinação	(graus)
p _h = potência corrimão	(W)
η _s = eficiência sistema de transmissão	(%)
η _g = eficiência da caixa de engrenagens	(%)

3.2.2. Tipos de comando existentes

As instalações de escadas e tapetes rolantes são maioritariamente alimentadas por motores de indução. Contudo, com o aparecimento dos novos motores de ímanes permanentes, referenciados no capítulo 2, existem novas possibilidades de alimentação.

Para alcançar redução do consumo de energia numa instalação de escadas ou tapetes rolantes é necessário ajustar o funcionamento da mesma ao padrão de tráfego da instalação e/ou otimizar a eficiência do motor fazendo com que trabalhe na janela óptima de funcionamento.

A eficiência energética também pode ser atingida através da melhoria do rendimento global do motor, onde as novas tecnologias de ímanes permanentes e rotor de cobre têm um papel fundamental.

De seguida são apresentados os tipos de comando que existem para escadas e tapetes rolantes:

3.2.2.1. Conexão estrela-triângulo

Este método consiste em ligar o motor directamente à rede, podendo alterar o tipo de ligação entre estrela ou triângulo consoante o tráfego da escada, de forma a reduzir o consumo.

No entanto, este método não é recomendado por originar elevadas correntes de arranque.

3.2.2.2. Arrancadores suaves (*Soft-Starters*)

Estes dispositivos possuem electrónica de potência capaz de otimizar a fase de arranque, reduzindo significativamente as correntes de arranque.

Contudo este tipo de controlo não tem capacidade de controlo da velocidade do motor.

3.2.2.3. Controladores de factor de potência

Estes controladores, monitorizam constantemente o factor de potência do motor, optimizando a tensão aplicada de modo a reduzir as perdas.

Apesar de não permitirem variação de velocidade, ajustam continuamente o binário de saída consoante as exigências da carga através da monitorização do factor de potência.

3.2.2.4. Variadores de tensão e frequência em malha aberta (sem realimentação)

Este tipo de comando promove um arranque suave, além de reduzir bastante as correntes envolvidas na fase do arranque da escada.

Para além disso, permite variar a velocidade da instalação mantendo o binário constante.

3.2.2.5. Variadores de tensão e frequência em malha fechada (com realimentação)

Com este tipo de equipamento é possível obter as vantagens do variador de frequência em malha aberta, além de estar constantemente a monitorizar o factor de potência ajustando a tensão consoante as exigências de binário, conforme é efectuado nos controladores de factor de potência.

Estes três últimos tipos de comando foram alvo de estudo detalhado no capítulo 6, tendo sido efectuado um estudo económico da implementação de cada um a uma instalação em concreto.

O ajuste do funcionamento da instalação pode ser adequado ao padrão de tráfego através de um funcionamento intermitente ou um funcionamento em duas velocidades.

Importa ainda referir que nos sistemas que promovem a variação de velocidade, é necessário instalar periféricos de detecção de passageiros, de forma a adequar o funcionamento mediante o tráfego.

Estes periféricos podem ser sensores de infravermelhos ou de ultra-sons.



Figura 3.9 – Pormenor de um sensor ultra-sónico de aproximação numa escada rolante [34].

Capítulo 4

Consumo de energia nos sistemas de transporte vertical

No âmbito do protocolo de Quioto torna-se imperativo reduzir o consumo de energia nos edifícios, que pode ser alcançado através da melhoria da eficiência energética dos sistemas pertencentes ao edifício.

Dependendo do tipo de edifício e dos seus utilizadores, o transporte vertical pode assumir um papel significativo, consumindo entre 5 e 15% da energia total gasta pelo edifício. [23]

A figura 4.1 ilustra os vários sistemas de um edifício de escritórios desagregados por consumo.

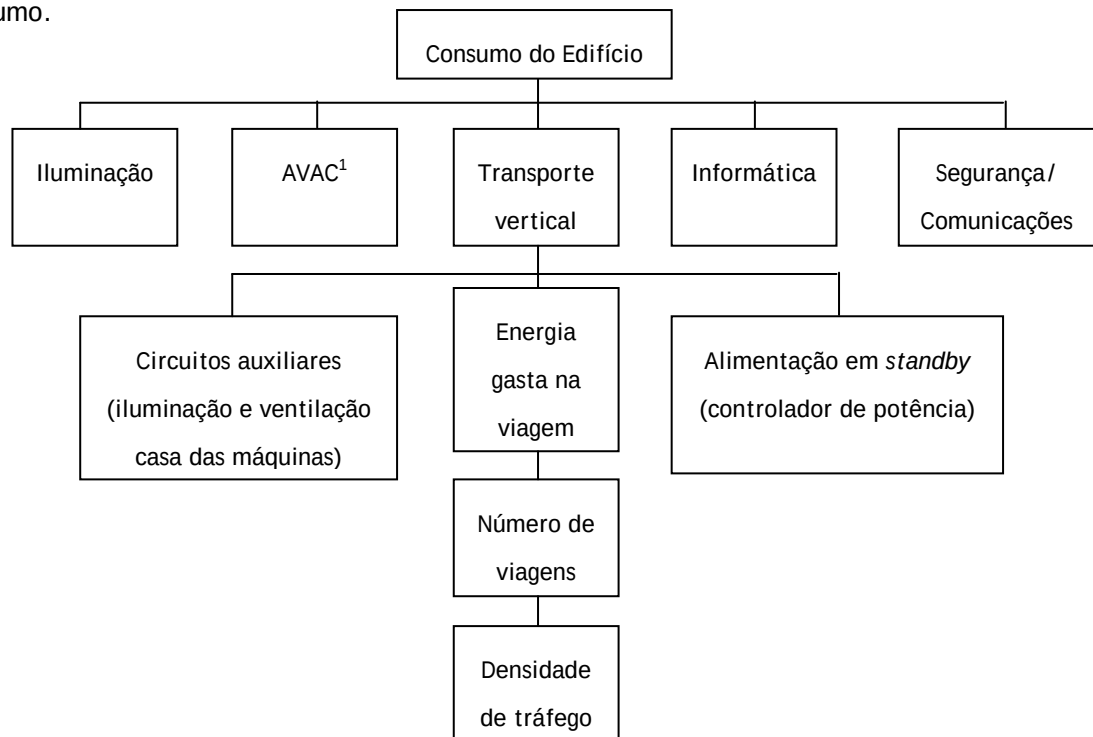


Figura 4.1 – Fluxograma dos vários sistemas de um edifício [23].

¹ AVAC: Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

Um estudo efectuado pela Edifícios Saudáveis Consultores revelou que a parcela energética requerida pelo transporte vertical num centro comercial padrão corresponde a cerca de 9% da energia gasta pelos serviços comuns do centro, como se pode constatar na imagem 4.2.

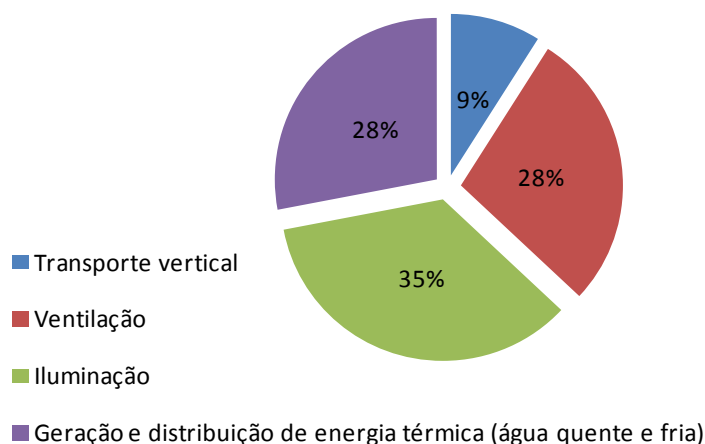


Figura 4.2 – Desagregação dos consumos por sistema num centro comercial padrão [35].

Actualmente, com as novas necessidades de certificação de edifícios, torna-se necessário avaliar correctamente o desempenho das instalações de transporte vertical existentes nos mesmos.

Nesta tentativa, foi criada uma norma internacional ISO/DIS 25745, que contém os procedimentos de estimativa, medição e conformidade a efectuar, mencionados na 1ª parte da dita norma, existindo ainda uma segunda parte, actualmente em estudo, que definirá a classificação energética das instalações de transporte vertical.

Foi criado um grupo de estudo composto por várias instituições, no âmbito do projecto E4, liderado pela Universidade de Coimbra, que tem estudado várias instalações de transporte vertical, na tentativa de caracterizar os vários perfis de consumo. Com esta medida, pretende-se criar um sistema de classificação energética mais realista.

4.1. Medição de energia e conformidade (ISO/DIS 25745-1)

A primeira parte da norma internacional ISO/DIS 25475, define os procedimentos de medição de consumo de energia nas instalações de elevadores, escadas e passadeiras rolantes. São também propostas ferramentas para estimar o consumo destas instalações num edifício.

O uso desta norma aplica-se para avaliar o desempenho das referidas instalações, sendo referência para: [36]

- Proprietários de edifícios que queiram determinar o consumo envolvido no transporte vertical;
- Instaladores e agentes de manutenção de instalações de transporte vertical;
- Consultores e arquitectos envolvidos no projecto de elevadores e escadas e passadeiras rolantes.

O consumo total de energia durante o ciclo de vida dos elevadores, escadas e tapetes rolantes contempla a energia necessária para o fabrico, instalação, operação e

desmantelamento dessas instalações. Contudo, a norma ISO/DIS 25745 contempla apenas o consumo de energia relativo à fase de operação.

A medição do consumo de energia pode ser usada para verificar o consumo de novas instalações ou para confirmar que não existem diferenças significativas no consumo de energia ao longo do tempo de vida útil das instalações.

O âmbito desta norma contempla as 3 fases: a fase de planeamento, a fase de implementação e a verificação de conformidade ao longo da vida útil da instalação.

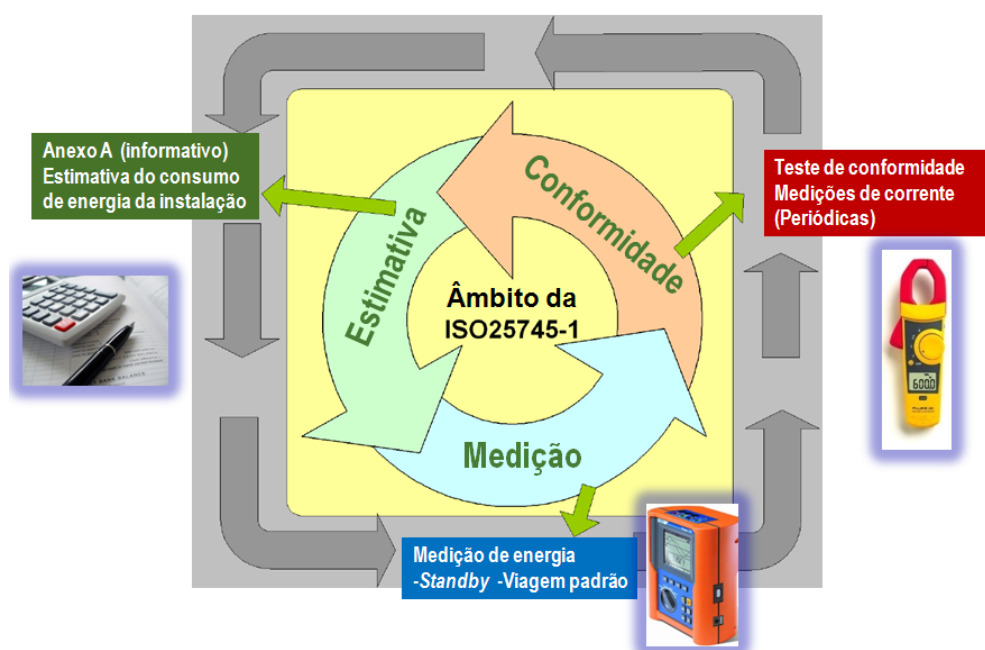


Figura 4.3 – Diagrama representativo do âmbito da norma ISO25745-1

4.1.1. Fase de planeamento

4.1.1.1. Elevadores

No anexo A da norma ISO/DIS 25745-1 é apresentado um modelo simples para estimar o consumo de energia dos elevadores, passível de ser aplicado se não estiver disponível o modelo apropriado da instalação em questão.

Isto torna-se útil para estimar a parcela de energia necessária para os elevadores num edifício que está ainda em projecto.

As variáveis que devem ser tomadas em consideração na fase de projecto de uma instalação de elevadores são: a lotação da cabina, o número médio de viagens por ano e a altura máxima de viagem.

De seguida é apresentado o modelo simples para prever o consumo de elevadores contemplado na norma: [36]

$$E_{\text{elevador}} = k_1 \times \frac{k_2 \times H \times F}{v \times 3600} \times P + E_{\text{standby}} \quad (4.1)$$

Onde:

E_{elevador} = energia usada pela instalação de elevadores por ano (kWh/ano)

E_{standby} = energia de *standby* gasta por ano (kWh/ano)

k_1 = factor para o tipo de controlo
 = 1.6 para controlo de tensão (ACVV)
 = 1.0 para controlo de tensão e frequência (VVVF)
 = 0.6 para controlo VVVF regenerativo

k_2 = factor distância de viagem média = 1 para 2 pisos
 = 0.5 para > 2 pisos ou instalações com 2 elevadores
 = 0.3 para instalações com 3 ou mais elevadores

H = distância máxima de viagem (metros)

F = viagens por ano ver tabela 2.1 (entre 100000 e 300000)

P = potência especificada do elevador = $P_1 \times P_0$ (kW)

Onde:

P_1 = factor de balanceamento
 = 1.0 para 50% de balanço
 = 0.8 para 40% de balanço
 = 0.6 para 30% de balanço

$$P_0 = \frac{(0.5 \times L \times v \times g_n)}{1000 \times \eta_s \times \eta_g \times \eta_m} \quad (4.2)$$

Onde:

η_s = eficiência do eixo/ suspensão = 0.85

η_g = eficiência da caixa = 0.75 para engrenagem sem-fim ; 1.0 para *gearless*

η_m = eficiência do motor = 0.75 para motor normal ; 0.85 com VVVF

g_n = aceleração da gravidade = 9,81 m/s²

L = lotação da cabina (kg)

v = velocidade nominal (m/s)

Tabela 4.1 — Número de viagens por dia consoante o tipo de edifício [37].

Factor de utilização	Arranques/hora	Viagens/dia	Exemplos (dias por semana)
Baixo	60	<100	Residencial (7) cargas (5)
Médio	120	300	Residencial (7), universidades (5)
Alto	180	750	Escritórios (5) ; Aeroportos (7)
Intensivo	240	1000	Escritórios (5)

Este modelo oferece problemas em alguns casos, pois não contempla algumas tecnologias, como por exemplo a hidráulica.

4.1.1.2. Escadas rolantes

A norma ISO/DIS 25745-1 ainda não contempla nenhum modelo matemático para estimar o consumo de escadas e tapetes rolantes.

No entanto, existe um modelo matemático proposto por *Dr. Lutfi Al Sharif* que estima o consumo destas instalações.

O consumo de energia nestes casos pode ser dividido em perdas fixas e perdas variáveis.

As perdas fixas (L_f) em kWh por dia, podem ser calculadas através da equação 4.3. [38]

$$L_f = (0.55 \times R + 1.95) \times H \quad (4.3)$$

Onde:

R = desnível da instalação (m)

H = horas de funcionamento por dia (h)

Esta equação ignora os aspectos mecânicos da escada ou tapete. Estes aspectos englobam o sistema de transmissão, rolamentos e engrenagens. A maioria das escadas utiliza rolamentos de esferas, corrente de transmissão e caixa de engrenagens involuta, onde é aplicável a equação 4.3.

No entanto, o modelo contempla outras fórmulas para as escadas que usem componentes distintos dos referidos que não foram aqui apresentadas.

As perdas variáveis (L_v) em kWh por dia, são calculadas pela equação:

$$L_v = \frac{P \times W \times 9.81 \times R}{3600 \times 10^3} \times k \quad (4.4)$$

Onde:

P = número de passageiros que utilizam a escada por dia

W = peso médio de um passageiro (kg)

R = desnível da instalação (m)

k = factor de andamento

O factor de andamento (k) varia entre 0.7 e 1 consoante existam passageiros que caminhem em cima da escada ou não. O valor mais baixo aplica-se quando uma elevada percentagem de passageiros caminha pela escada, enquanto que o valor mais alto deve ser aplicado se os passageiros se mantiverem estáticos durante a viagem.

As perdas totais diárias (L_d) são obtidas somando as perdas fixas (L_f) com as perdas variáveis (L_v), no caso de uma escada ascendente, enquanto que numa escada descendente são obtidas subtraindo as perdas variáveis às perdas fixas.

$$L_d = L_f \pm L_v \quad (4.5)$$

A figura 4.4 mostra a relação entre o consumo de energia de uma escada ou tapete rolante ascendente e descendente, com a altura e o número de passageiros que ocupam a instalação.

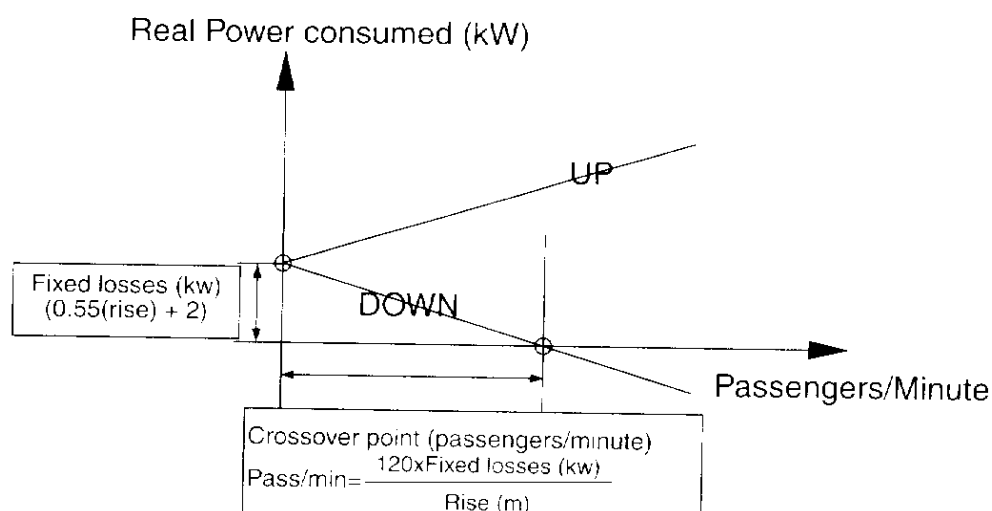


Figura 4.4 – Representação gráfica entre o consumo de energia e os passageiros transportados por uma escada rolante [38].

A regeneração de energia numa escada descendente acontece quando: [38]

$$\text{Passageiros / min} > \frac{120 \times (0.55 \times R + 1.95)}{R} \quad (4.6)$$

Onde:

R = desnível da instalação (m)

4.1.2. Fase de medição e verificação no local

Esta fase deve ser efectuada quando é montada a nova instalação no local ou depois de um processo de modernização de uma instalação.

Pretende-se verificar neste processo o perfil de consumo de cada instalação, de forma a verificar na realidade o consumo de energia dos sistemas de transporte vertical instalados.

Este teste deve ser efectuado por peritos qualificados e aparelhagem adequada.

Tabela 4.2 — Resumo dos procedimentos a efectuar na fase de medição [36].

Quando ?	Medições a efectuar	Equipamento necessário
- Na fase de comissionamento de novas instalações - Após uma modernização	- Energia gasta na viagem padrão - Energia de <i>standby</i> - Energia sistemas auxiliares (operação) - Energia sistemas auxiliares (<i>standby</i>)	Analizador de energia

A viagem padrão, definida pela ISO, consiste numa viagem ascendente e descendente entre os pisos terminais do elevador, com a cabine vazia e incluindo a operação de abertura e fecho de portas.

Na figura 4.5 está representada uma viagem padrão de um elevador.

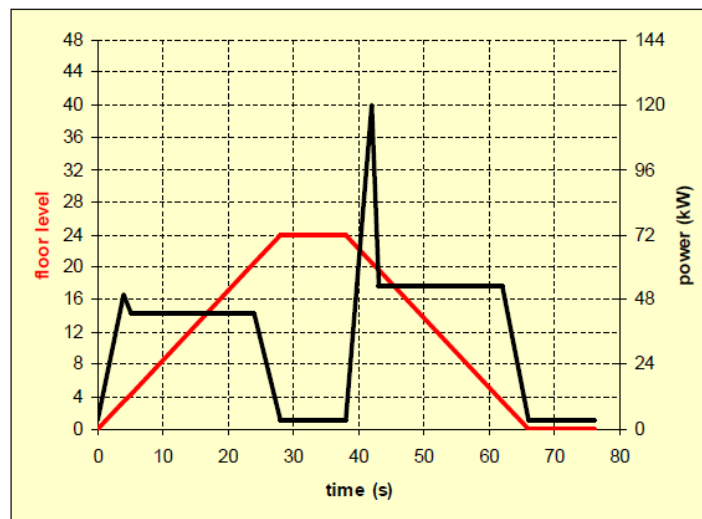


Figura 4.5 – Representação gráfica do consumo de energia e da altura ao solo numa viagem padrão (entre os pisos terminais) [39].

Durante esta viagem, a energia activa e reactiva exigida pela instalação varia muito rapidamente no tempo, devendo ser registados todos os instantes de forma cuidada, o que exige uma correcta parametrização do equipamento de medida e uma sincronização eficaz entre as operações de medição e as operações em campo. De seguida é apresentado um gráfico da variação de potência activa durante uma viagem padrão.

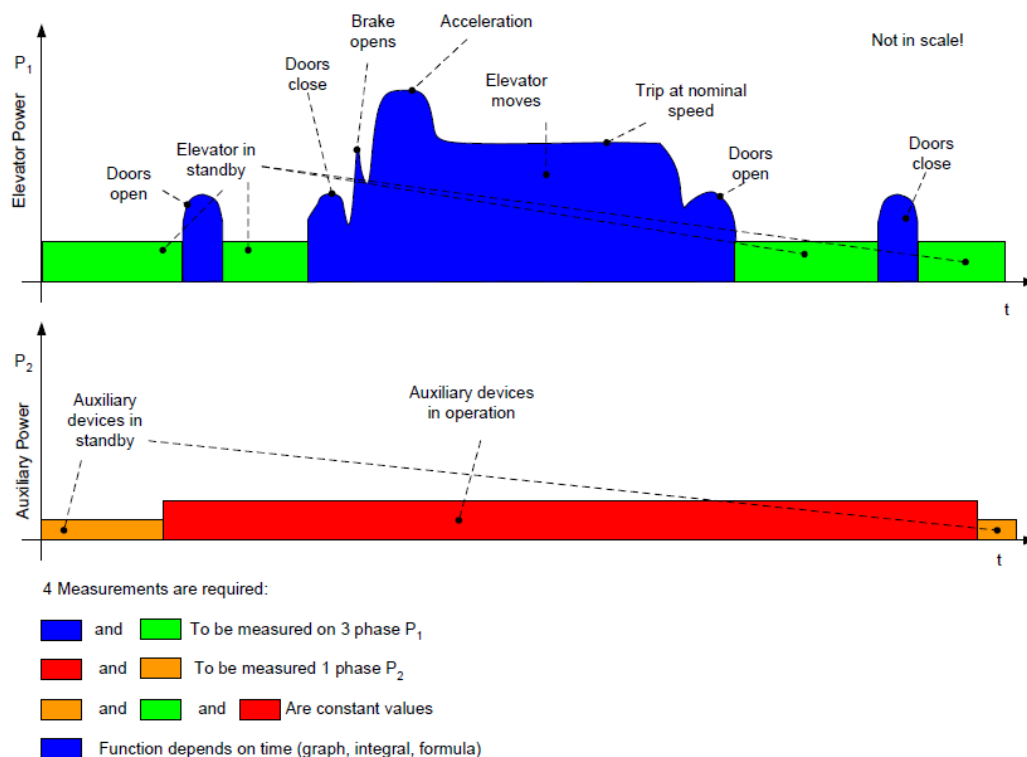


Figura 4.6 – Representação gráfica do consumo de energia durante uma viagem padrão nos circuitos principal e auxiliar [40].

Este processo também exige um perfeito conhecimento dos circuitos de alimentação, pois existem medidas que são efectuadas em modo trifásico, e outras efectuadas em modo monofásico.

É importante identificar correctamente os circuitos que fazem parte da instalação a medir e os que pertencem aos restantes serviços de um edifício.

A figura 4.7 mostra um esquemático do tipo de circuitos que podem existir nestas instalações.

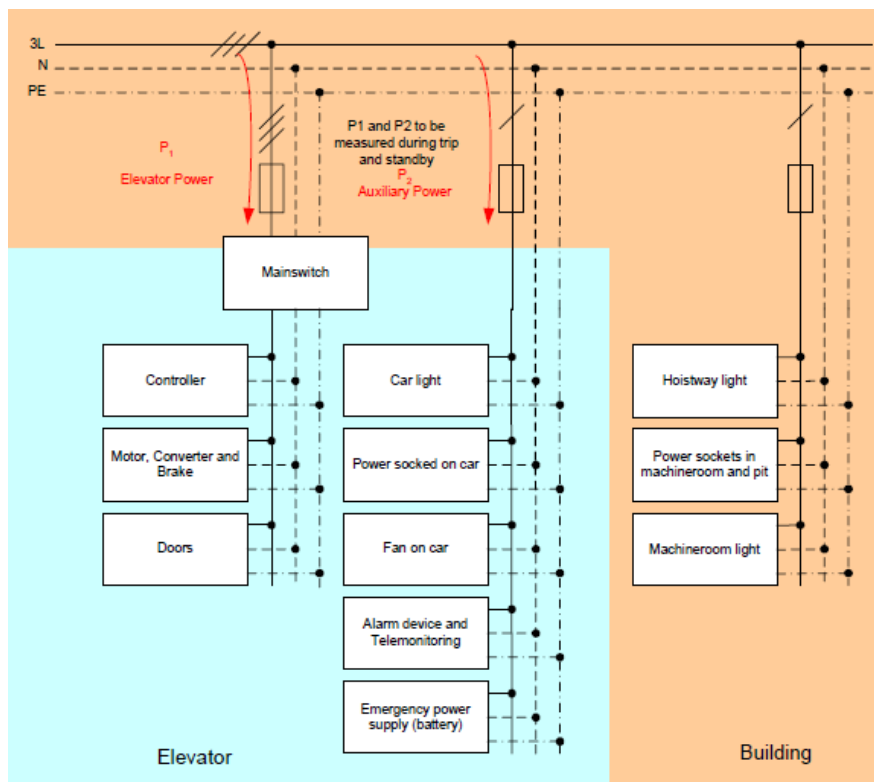


Figura 4.7 – Esquemático dos circuitos eléctricos existentes num elevador [40].

Todo este processo deve ser efectuado a cada instalação em particular, mesmo em sistemas contíguos.

4.1.3. Verificação de conformidade

Ao longo da vida útil de uma instalação de transporte vertical é preciso garantir que se encontra em conformidade.

Efectuar testes periódicos com pinça amperimétrica é o que está referido na norma ISO 25745, no entanto essa periodicidade não está ainda definida.

Com este teste pretende-se detectar possíveis discrepâncias no consumo das instalações.

Depois do perfil de consumo das mesmas estar completamente caracterizado, basta fazer uma leitura de corrente com pinça amperimétrica para detectar possíveis desvios, não exigindo muitos recursos humanos nem de aparelhagem.

No entanto, este procedimento só deve ser efectuado nesta fase, pois não serve para caracterizar perfis de consumos, uma vez que a corrente não varia linearmente com as exigências de carga da instalação.

Na figura 4.8 podemos a variação dos diversos parâmetros do motor consoante o regime de carga.

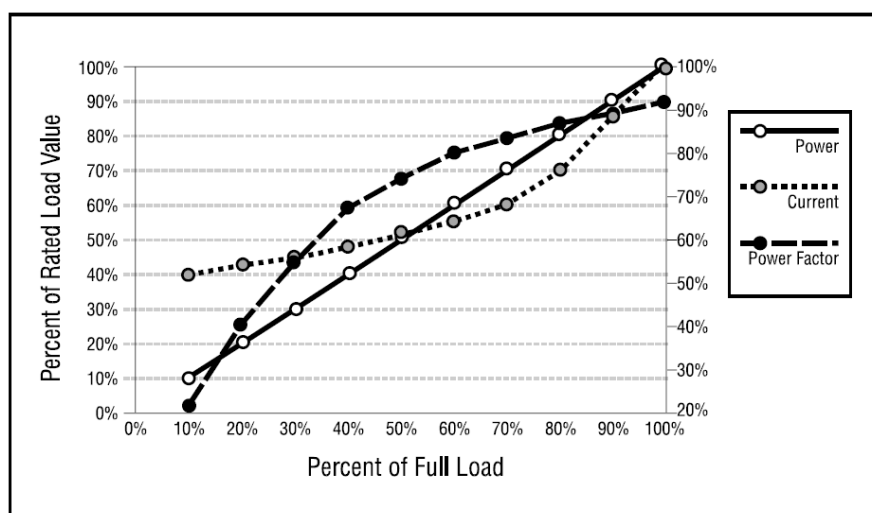


Figura 4.8 – Representação gráfica dos diversos parâmetros de um motor eléctrico consoante a carga [41].

Nas regiões de carga parcial, a corrente do motor tem um comportamento não linear, não servindo assim como parâmetro de caracterização do perfil de uma instalação, devendo esta medição ser usada somente para efeitos de verificação de conformidade.

Na tabela 4.3 encontram-se os procedimentos a efectuar nesta fase.

Tabela 4.3 — Resumo dos procedimentos a efectuar na fase de verificação de conformidade [36].

Quando ?	Medições a efectuar	Equipamento necessário
Periodicamente ao longo da vida útil da instalação	- Corrente em andamento - Corrente em <i>standby</i> - Corrente no circuito auxiliar	Pinça amperimétrica

4.2. Eficiência energética (ISO/DIS 25745-2)

Como já foi referido, esta parte da norma encontra-se actualmente em estudo, tendo surgindo para já algumas ideias, baseadas numa classificação por pontos atribuídos por tecnologia.

Este facto poderá limitar o desenvolvimento de outras tecnologias que à partida estão cotadas com pontuação inferior.

Contudo foi estudada a classificação voluntária actualmente em vigor (VDI 4007) que de algum modo está a servir como directriz para o grupo de estudo.

4.2.1. Classificação VDI 4707

Esta classificação de carácter voluntário, aplicável a elevadores contempla os seguintes parâmetros na classificação: [42]

- Potência de *standby* (W)
- Consumo durante a viagem (mWh/m.kg)
- Classe de eficiência do sistema baseada no consumo específico diário (A;B;C;D;E;F;G)

A etiqueta atribuída tem o aspecto da mostrada na figura 4.9:

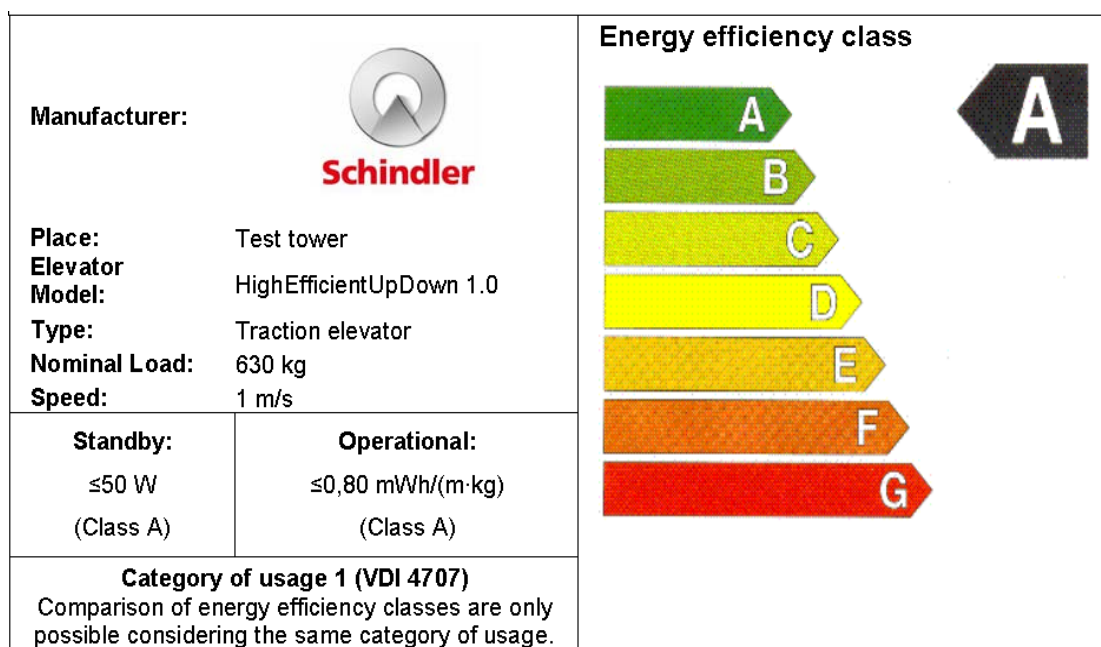


Figura 4.9 – Pormenor de um certificado energético para elevadores [42].

A potência de *standby* e o consumo de operação são definidos à partida pelo fabricante, sendo atribuída uma classe a cada um destes parâmetros, cuja correspondência é apresentada nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 — Valores máximos para a potência de *standby* mediante a classe [42].

Standby (W)	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	≤ 1600	---
Classe	A	B	C	D	E	F	G

Tabela 4.5 — Valores máximos para consumo em operação mediante a classe [42].

Consumo operação (mWh/m.kg)	≤ 0.80	≤ 1.2	≤ 1.8	≤ 2.7	≤ 4.0	≤ 6.0	> 6.0
Classe	A	B	C	D	E	F	G

Posteriormente é necessário ver em que tipo de edifício vai trabalhar a instalação, de modo a saber qual será a categoria de utilização.

Tabela 4.6 — Tempos médios de viagem consoante a categoria de utilização do elevador [42].

Categoria de utilização	1	2	3	4
Intensidade de uso/frequência	Baixa Rara	Média Ocasional	Alta Frequente	Muito alta Muito frequente
Tempo médio de viagem em horas por dia ¹	0.5 (≤1)	1.5 (≤1-2)	3 (≤2-4.5)	6 (>4.5)
Tempo médio de standby em horas por dia	23.5	22.5	21	18
Tipos de edifício e uso	• Blocos residenciais com menos de 10 habitações; • Pequenos edifícios de escritórios (2 a 5 pisos); • Montacargas.	• Blocos residenciais com menos de 50 habitações; • Edifícios médios de escritórios acima de 10 pisos; • Hotéis.	• Blocos residenciais com mais de 50 habitações; • Hospitais médios.	• Edifícios administrativos e de escritórios com mais de 100m de altura; • Hospitais de grande dimensão; • Montacargas num processo fabril.

Depois de determinada a categoria de utilização da instalação, é necessário calcular a energia específica diária da instalação através da equação 4.7. [42]

¹ Determinado com base no número médio de viagens e na duração média de uma viagem.

$$E_{\text{específicadiária}} = \frac{(P_{\text{standby}} \times 1000 \times h_{\text{standby/dia}}) + (E_{\text{operação}} \times v \times h_{\text{viagem/dia}} \times 3600 \times L)}{v \times h_{\text{viagem/dia}} \times 3600 \times L} \quad (4.7)$$

Onde:

$E_{\text{específica diária}}$	(mWh/kg.m.d)
P_{standby}	(W)
$h_{\text{standby/dia}}$	(tabela 4.5)
$h_{\text{viagem/dia}}$	(tabela 4.5)
$E_{\text{operação}}$	(mWh/kg.m)
v	(velocidade do elevador em m/s)
L	(lotação da cabina em kg)

Finalmente, com o resultado da equação verifica-se em qual das classes recai a instalação através da tabela 4.7.

Tabela 4.7 — Valores de consumo específico da instalação (mWh/Kg.m.d) consoante a classe de eficiência e a categoria de utilização do elevador.

Categoria utilização	Classe eficiência energética						
	A	B	C	D	E	F	G
1	≤1.45	≤2.51	≤4.41	≤7.92	≤14.41	≤26.88	>26.88
2	≤1.01	≤1.62	≤2.63	≤4.37	≤7.33	≤12.67	>12.67
3	≤0.90	≤1.39	≤2.19	≤3.48	≤5.56	≤9.11	>9.11
4	≤0.84	≤1.28	≤1.97	≤3.04	≤4.67	≤7.33	>7.33

Na figura 4.10 é apresentado um fluxograma representativo das várias etapas do processo de classificação de uma instalação de transporte vertical.

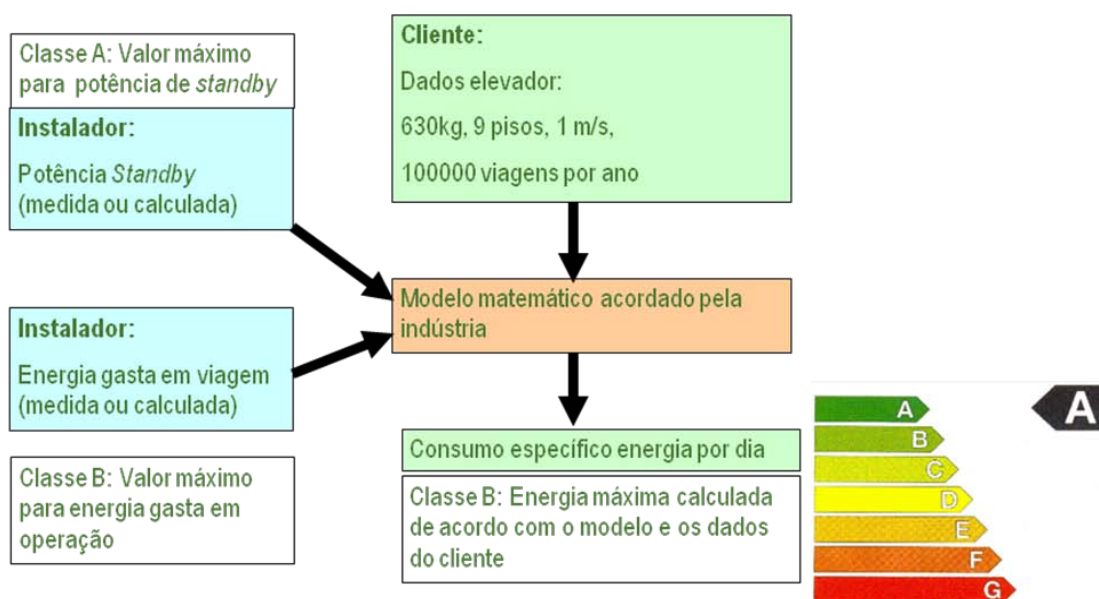


Figura 4.10 – Fluxograma representativo das várias etapas de classificação de um elevador.

Importa referir que a classificação VDI 4707 serve actualmente como directiva para a elaboração da futura certificação energética internacional das instalações de transporte vertical.

Este processo está a cargo da Comissão Europeia, ao abrigo do projecto E4, que tem como objectivo a criação de uma metodologia própria de análise de desempenho de elevadores e escadas rolantes, pois a norma ISO 25745-1 ainda não dá as respostas necessárias.

A duração prevista deste projecto contempla três anos, terminando o mesmo em 2010.

Capítulo 5

Dispositivo de monitorização de tráfego (LIMPP)

O tráfego de pessoas em escadas e/ou tapetes rolantes é difícil de analisar sem o auxílio de um dispositivo electrónico que efectue a monitorização do sistema.

No entanto, para analisar a viabilidade da implementação de sistemas de poupança de energia é de primordial importância saber o padrão de tráfego que afecta uma determinada instalação, mais concretamente o período de tempo em que a mesma poderia estar num regime de *standby*, isto é, a uma velocidade inferior à nominal ou, em repouso, se estiver em causa uma operação intermitente.

Assim sendo, surgiu uma forte necessidade de construir um equipamento que permitisse monitorizar o tráfego de uma instalação.

5.1. Descrição geral de funcionamento

O equipamento desenvolvido foi denominado de LIMPP (Luz Intermitente Mediante Passagem de Pessoas) tendo sido projectado, desenvolvido e testado em cerca de duas semanas.

O funcionamento do LIMPP foi baseado na lógica de controlo dos sistemas de gestão de energia existentes em algumas escadas e/ou tapetes rolantes, que detectam actividade na instalação mediante sensores de movimento. Os sensores mais utilizados neste tipo de aplicações são do tipo ultra-sónico ou de infravermelhos.

Para o desenvolvimento deste equipamento foram usados sensores de infravermelhos.

O sistema desenvolvido opera do seguinte modo:

- Quando alguém se aproxima da entrada da instalação, interrompendo a barreira de infravermelhos, o díodo emissor de luz (LED) da interface luminosa do LIMPP é accionado;
- Não existindo pessoas na entrada da escada, o sensor não é interrompido;
- Quando a barreira deixa de ser interrompida, é iniciado imediatamente o processo de temporização, que sendo programável, foi ajustado previamente para o tempo médio de entrada em *standby* de um sistema economizador de energia (20 segundos);

- Se durante este processo de temporização, houver interrupção do feixe, o temporizador é imediatamente inicializado;
- Não havendo interrupção da barreira de infravermelhos durante a temporização e terminados os 20 segundos, o LED da interface luminosa do LIMPP apaga-se;
- O *led* permanece desligado até existir novamente actividade no sensor de infravermelhos, caso em que acenderá imediatamente;
- Os diferentes estados da interface luminosa são registados pelo sensor de luz dos *data loggers* instalados no interior do LIMPP, sendo gravados e sincronizados com uma base de tempo.

Em seguida é apresentado o funcionamento do LIMPP através de um fluxograma:

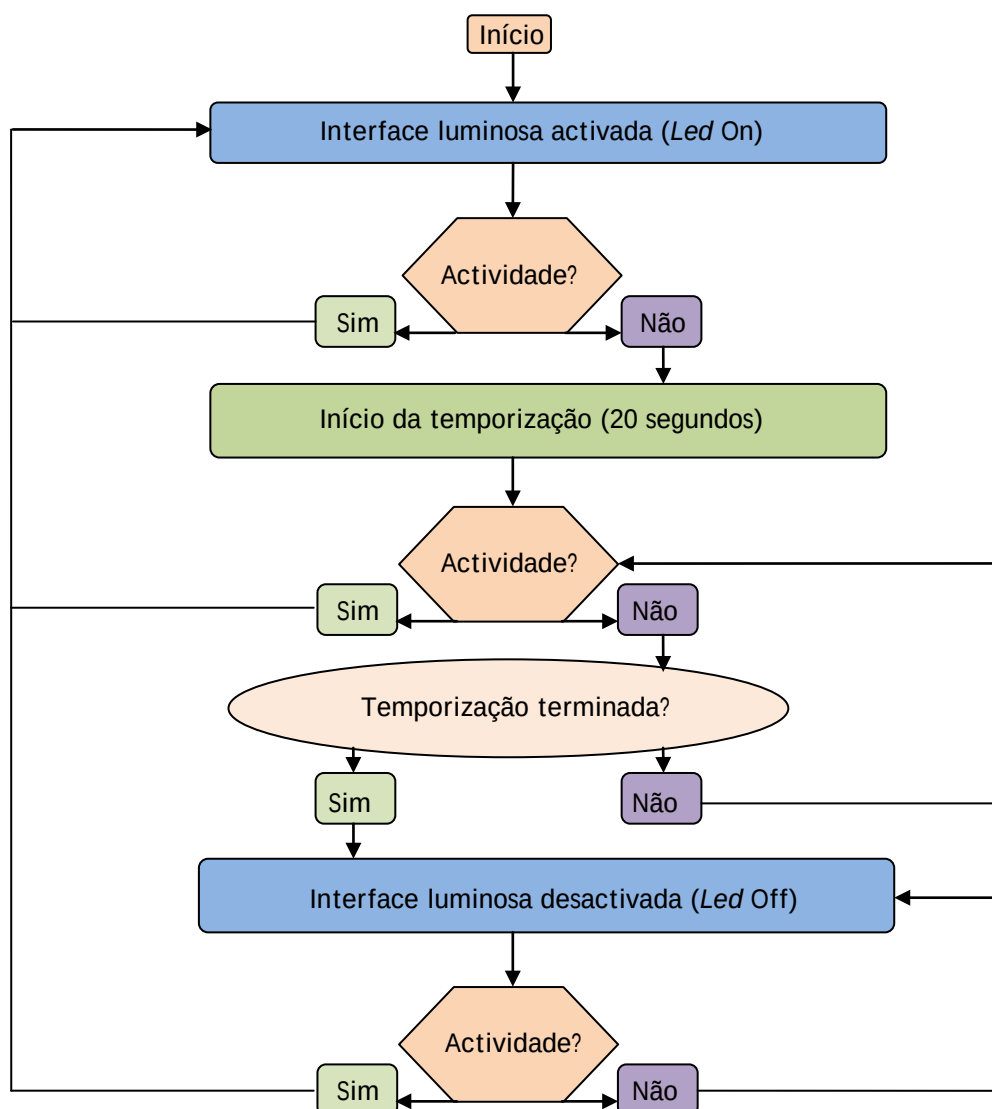


Figura 5.1 – Fluxograma representativo do modo de funcionamento do LIMPP

5.2. Detalhes construtivos

O módulo em questão é, essencialmente, uma interface entre diversos equipamentos. O diagrama de blocos do LIMPP é o seguinte:

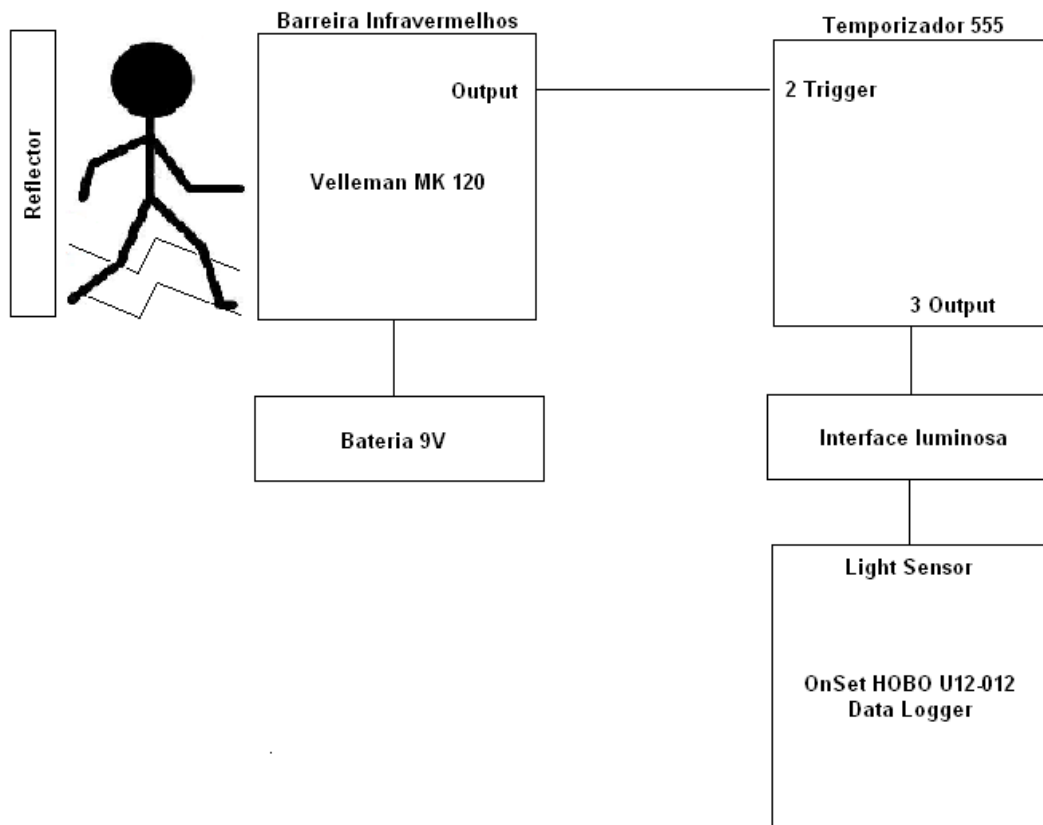


Figura 5.2 – Diagrama de blocos do módulo LIMPP.

De seguida serão analisados detalhadamente os diversos equipamentos constituintes do módulo LIMPP.

5.2.1. Barreira de infravermelhos *Velleman* MK120

Começando pela barreira de infravermelhos, foi utilizado um *kit* existente no mercado da marca *Velleman*, modelo MK120. Foi montado com todos os seus componentes originais, à excepção do bescouro, pois não era necessário haver uma sinalização sonora mediante a passagem de pessoas, mantendo-se somente a sinalização luminosa original.

Este *kit* é composto por dois circuitos, um emissor e outro receptor.

As características e os esquemas do kit em questão são apresentados em seguida: [43]

- Alcance: 1m a 4m
- Alimentação:
 - Receptor: 9 V CC / 50mA máx.
 - Emissor: 9 V CC / 20mA máx.

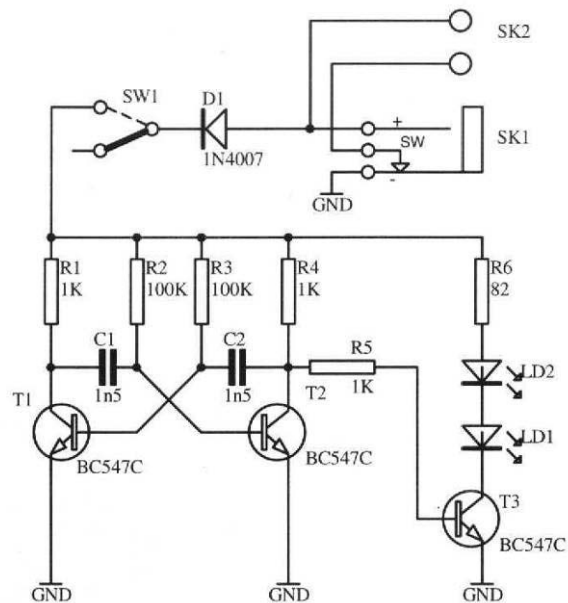


Figura 5.3 – Esquema eléctrico do circuito emissor de infravermelhos [43].

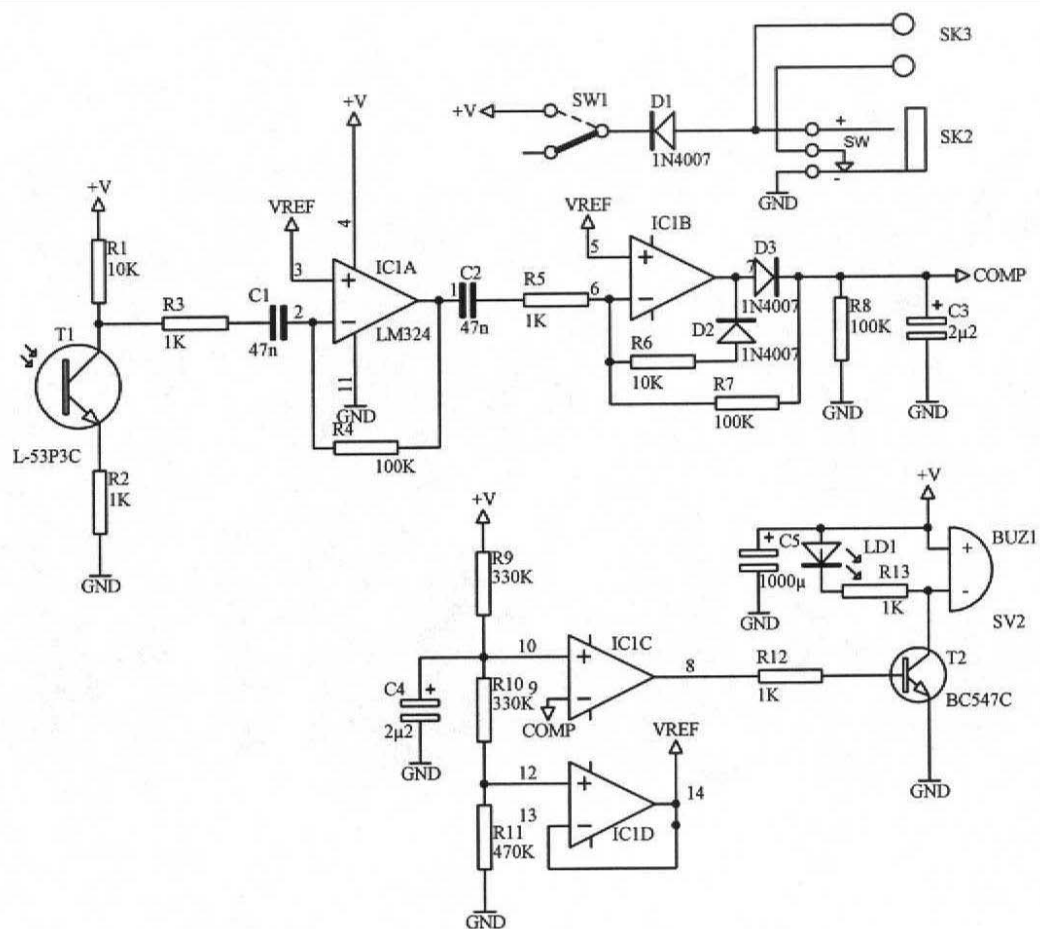


Figura 5.4 – Esquema eléctrico do circuito receptor de infravermelhos [43].

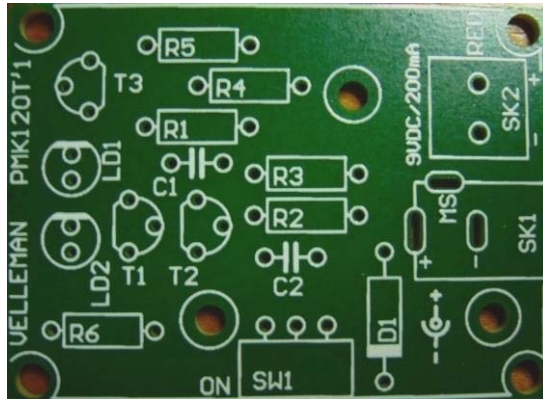


Figura 5.5 – Pormenor do circuito do emissor de infravermelhos.

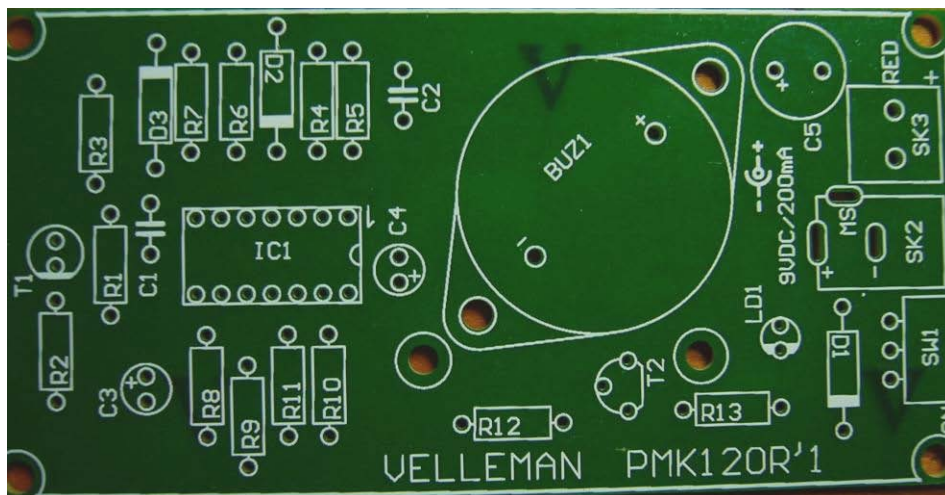


Figura 5.6 – Pormenor do circuito do receptor de infravermelhos.

Sempre que o feixe de infravermelhos é interrompido, acende-se o LED (LD1) no circuito receptor e o besouro (BUZ1) é accionado, no entanto, como não era necessário para a aplicação, o besouro não foi instalado.

5.2.2. Interface de temporização

O circuito encarregue da temporização, foi projectado pelo autor deste relatório, sendo composto principalmente por um circuito integrado 555 e um acoplador óptico 4N25.

O acoplador óptico 4N25 foi utilizado para assegurar o isolamento eléctrico entre a interface temporizadora e o circuito receptor de infravermelhos.

O circuito integrado 555 foi montado no modo de atraso temporal, estando a montagem representada na figura 5.7.

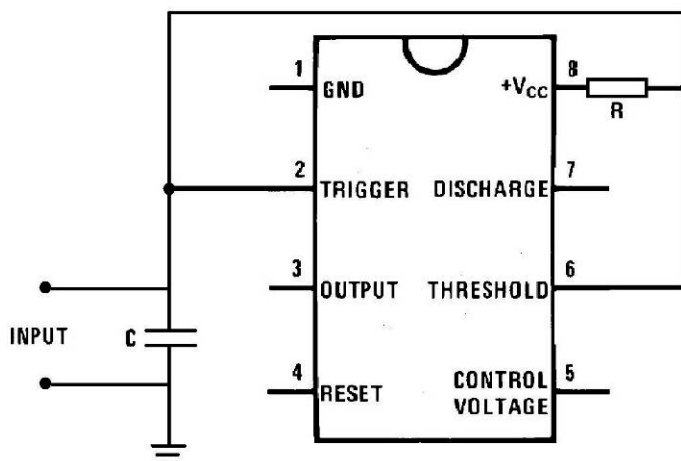


Figura 5.7 - Montagem em atraso temporal do circuito 555

Neste modo de funcionamento, a saída (pino 3) só muda de estado após decorrer um tempo determinado pela malha RC, a partir do momento em que a entrada (*input*) muda de estado. Os pinos de *Trigger* e de *Threshold* estão ligados juntos, monitorizando a tensão do condensador, não sendo usada a função de descarga (pino 7). A sequência de funcionamento começa quando a entrada é accionada, mantendo o condensador descarregado e forçando a saída do 555 ao estado alto. Quando a entrada deixa de estar activa, inicia-se o ciclo de carga do condensador. Quando a tensão no condensador atingir a tensão de *Threshold* ($2/3 \cdot V_{CC}$), faz a saída do 555 comutar para o estado baixo, permanecendo nesse estado até existir actividade na entrada.

A entrada representada na figura 5.7 foi ligada, através do acoplador óptico, à saída sonora do circuito receptor de infravermelhos. Assim, quando a barreira de infravermelhos é interrompida, a entrada é accionada, deixando de estar activa quando a barreira é restabelecida.

Por sua vez, a saída do circuito temporizador foi ligada à interface luminosa do LIMPP. Com esta montagem, o LED da interface luminosa acende quando a saída do temporizador se encontra no nível alto e apaga quando a saída está no nível baixo.

Na malha RC utilizada para a temporização, foi utilizado um condensador de 100 μF e um potenciómetro de 2,2 M Ω .

Foi utilizado um potenciómetro de modo a possibilitar um ajuste fácil e rápido do intervalo de temporização, que poderá ir desde 0 até 220 segundos.

De seguida é possível visualizar um conjunto de gráficos que fazem a correspondência entre alguns valores de RC e o intervalo de temporização gerado:

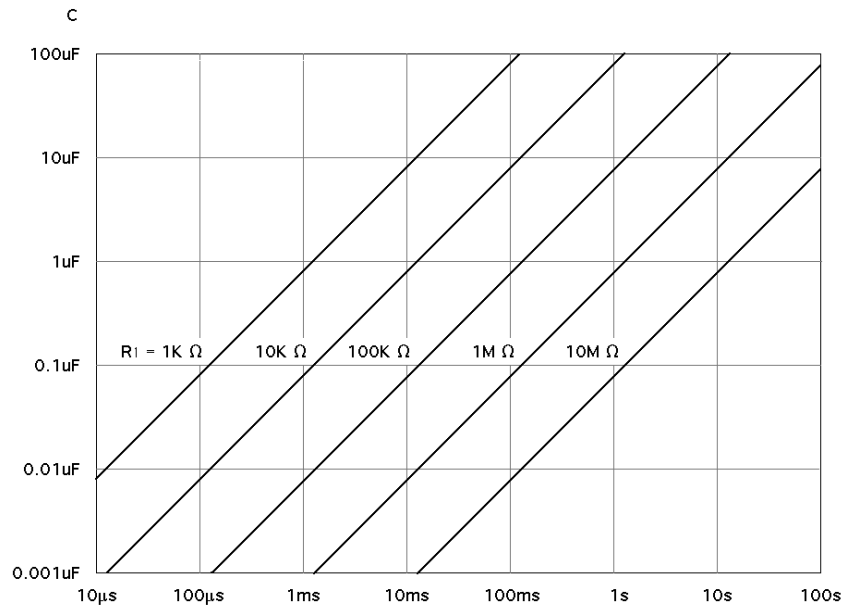


Figura 5.8 – Gráfico dos intervalos de temporização gerados pelo circuito 555 para alguns valores de RC [44].

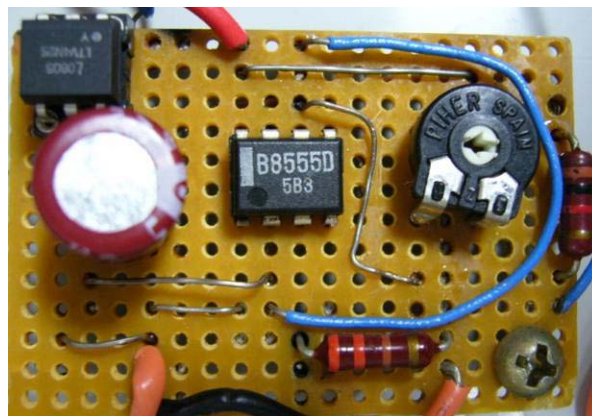


Figura 5.9 – Pormenor da interface temporizadora do LIMPP.

5.2.3. Interface luminosa

A interface luminosa é composta por dois díodos emissores de luz (LED), de baixo consumo, que foram ligados à saída do circuito temporizador.

Os LEDs foram montados numa placa por cima dos *data loggers*, sendo direccionados para os sensores de luz.

5.2.4. Interface de registo

A interface de registo do LIMPP é constituída por dois *data loggers* HOBO série U12-012.

Estes *loggers* possuem, entre outros sensores, um sensor de luz, que mede a intensidade luminosa em *lux*.

Na imagem seguinte está representada a resposta do sensor de luz comparativamente ao olho humano:

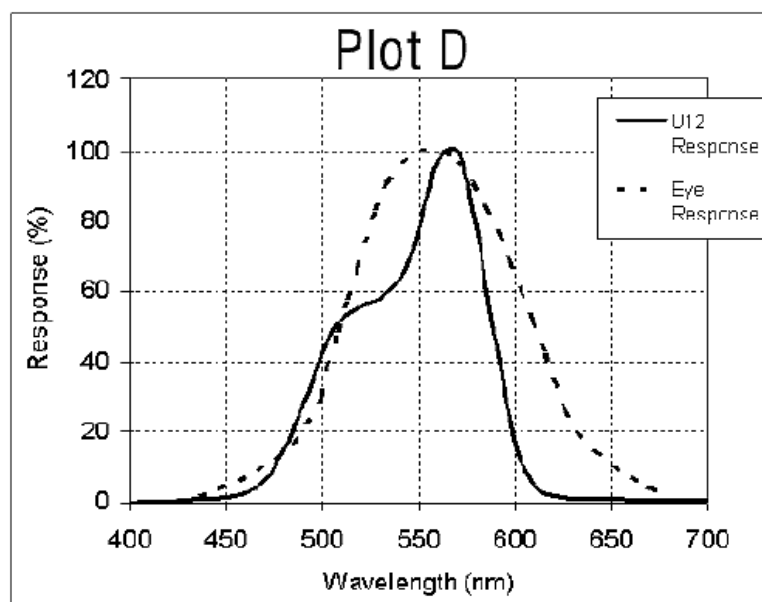


Figura 5.10 – Gráfico da resposta do sensor de luz existente no HOBO U12-012 [45]

Nos testes efectuados, quando a interface luminosa está activa é registado no sensor de luz, em média, uma intensidade de 160 lux. Quando a interface luminosa está desligada é registado um valor de 3,9 lux, que corresponde ao valor mínimo lido pelo sensor.

Estes dois valores têm uma ordem de grandeza distinta, o que permite identificar claramente os estados da interface luminosa.

Estes aparelhos possuem uma base de tempo que sincroniza a gravação dos diferentes valores registados no sensor.

Podem ainda ser programados para iniciar a gravação numa determinada data e hora.

A autonomia de gravação destes equipamentos corresponde a 2 dias de medição contínua, com intervalos de registo de 4 em 4 segundos. No LIMPP, foram instalados dois aparelhos deste tipo, duplicando a autonomia, permitindo 4 dias de monitorização.

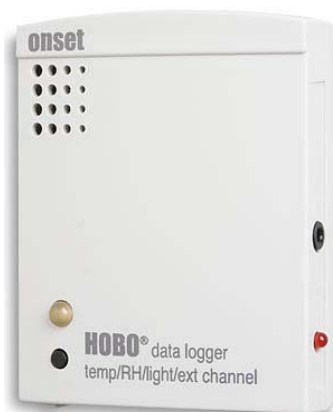


Figura 5.11 – Pormenor do *data logger* utilizado [45].

5.2.5. Alimentação

Como nota final, importa referir que a alimentação do LIMPP está a cargo de um conjunto de pilhas AA recarregáveis de 1,2 V. As mesmas foram montadas em suportes e a ligação eléctrica foi efectuada de modo a obter 9V na saída, tensão necessária para o funcionamento dos circuitos internos do equipamento.

A autonomia aproximada é de cerca de 5 dias, que sendo superior à autonomia de armazenamento de dados, permite uma monitorização constante de uma instalação durante 4 dias, sem qualquer tipo de intervenção.



Figura 5.12 – Dispositivo LIMPP

Capítulo 6

Caso de Estudo: escadas rolantes

Um dos objectos de estudo durante a realização deste trabalho, foi o transporte vertical de um centro comercial situado na cidade do Porto, mais concretamente, o sistema de escadas rolantes.

O objectivo do estudo foi analisar a viabilidade de algumas soluções de eficiência energética no campo do transporte vertical, nomeadamente verificar o potencial de redução no consumo energético.

Foram estudadas duas tecnologias distintas, que serão detalhadas ao longo do capítulo.

O cenário de teste foi constituído por duas escadas rolantes com sentidos distintos (i.e. ascendente e descendente).

6.1. Tipo de soluções estudadas

Para este estudo, foram analisadas duas tecnologias de optimização de consumo de energia distintas, passíveis de serem aplicadas em motores eléctricos de indução trifásicos, que são os utilizados em escadas rolantes.

A diferença fundamental entre as duas reside no facto de uma ser de velocidade constante enquanto que a outra é de velocidade variável.

No caso de aplicação em escadas rolantes, é possível utilizar as duas tecnologias. Contudo, poderá haver interesse de manter a velocidade constante, daí terem sido analisados os dois tipos de tecnologia.

Em resumo, a solução de velocidade variável é assegurada pela instalação de um variador electrónico de velocidade (VEV), sendo a de solução de velocidade constante assegurada por um controlador variador de tensão.

O funcionamento detalhado de cada uma destes sistemas será apresentado em seguida.

Contudo, como simplificação, a tecnologia de velocidade variável será referida neste documento como solução A, e a de velocidade constante referida como solução B.

Existe ainda uma solução C, que emprega as duas tecnologias no mesmo equipamento.

6.1.1. Descrição da tecnologia da solução A (velocidade variável)

Em instalações de escadas rolantes, a variação de velocidade toma uma importância considerável ao nível técnico e energético.

A velocidade dos motores de indução é determinada pela frequência da tensão de alimentação, pelo seu número de pólos e pelo seu factor de carga (a velocidade decresce ligeiramente à medida que a carga aumenta).

$$n_s = \frac{f}{p} \times 60 \quad (6.1)$$

Onde:

n_s = velocidade síncrona (r.p.m.)

f = frequência da tensão de alimentação (Hz)

p = número de pares de pólos

Assim, para controlar a velocidade deste tipo de motores, sem recurso a dispositivos mecânicos externos, é necessário variar a frequência da tensão de alimentação.

O objectivo dos variadores electrónicos de velocidade (VEV) é forçar o deslocamento da curva do binário em função da velocidade do motor, mantendo o binário máximo e o declive da região linear da curva aproximadamente constante.

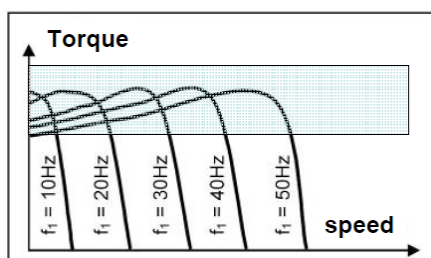


Figura 6.1 – Relação entre as curvas de binário-velocidade dos motores de indução e a frequência fundamental da tensão de alimentação [29].

Os VEV com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso são os mais utilizados para o controlo dos motores de indução.

Este tipo de variadores é basicamente constituído por um rectificador (controlado ou não) que converte a tensão alternada em contínua e por um inversor que converte a tensão contínua em alternada. O modo de funcionamento do inversor consiste em comutar a tensão contínua a frequências da ordem dos kHz (frequência de comutação), resultando à saída três formas de onda (sistema trifásico) compostas por vários impulsos de diferentes larguras.

Desta forma, actua-se sobre a amplitude (V) e a frequência (f) da tensão de alimentação dos motores, controlando-se assim a sua velocidade angular e o seu binário.

O sistema composto pelo controlador e motor possui um rendimento global inferior ao do motor alimentado directamente da rede, que se justifica pela existência de perdas no VEV e pelo aumento das perdas no motor (devido aos harmónicos de tensão e de corrente à saída do VEV). [46]

Na figura 6.2, mostra-se a dependência entre o rendimento do sistema VEV-motor e a frequência de comutação do VEV, mantendo a frequência fundamental (50Hz). O rendimento do sistema VEV-motor aumenta com a diminuição do valor da frequência de comutação uma

vez que, em princípio, quanto maior é a frequência de comutação maiores são as perdas no motor e no VEV.

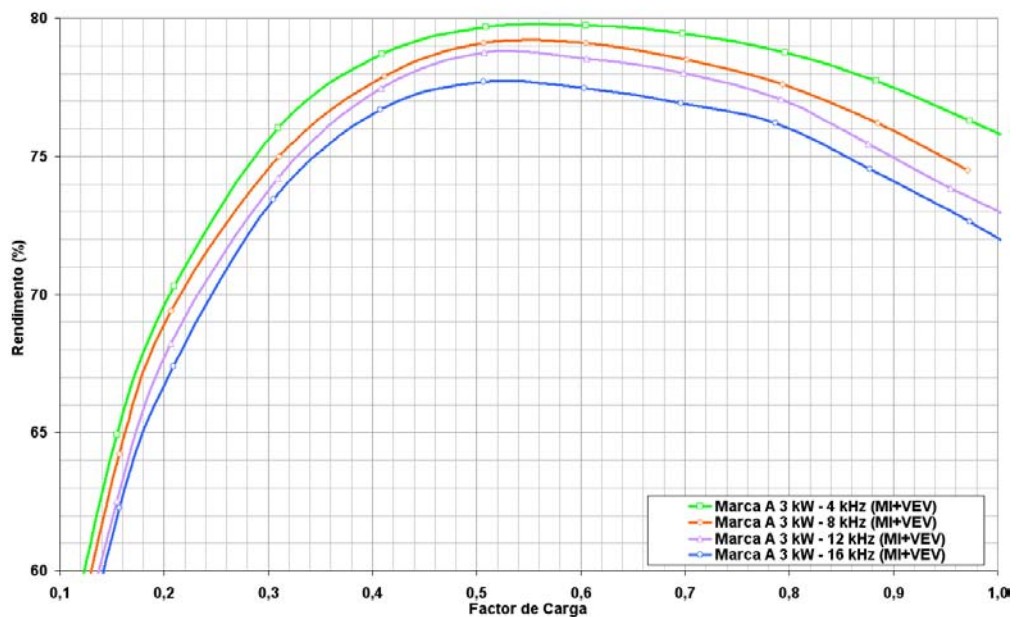


Figura 6.2 – Rendimento do sistema MI-VEV em função do factor de carga do motor de indução (MI) para diferentes valores da frequência de comutação (4, 8, 12 e 16 kHz) e para a mesma frequência fundamental (50Hz) [46].

Conclui-se assim que, em termos energéticos, um VEV deve funcionar com a frequência de comutação mais baixa. Em termos técnicos, a redução da frequência de comutação reduz a possibilidade de interferência electromagnética, de circulação de correntes de alta frequência através dos enrolamentos e de ocorrência de descargas parciais e desgaste do sistema de isolamento do motor. Todavia, a redução da frequência de comutação conduz ao aumento da vibração mecânica e do ruído do motor.

Nas aplicações de velocidade variável é ainda necessário ter em conta se a ventilação promovida pelo motor a velocidade reduzida é suficiente para os requisitos de carga, uma vez que nos motores auto-ventilados, o ventilador trabalha à mesma velocidade do motor.

6.1.2. Descrição da tecnologia da solução B (velocidade constante)

Um motor eléctrico, ao longo da sua operação, possui perdas eléctricas, mecânicas e magnéticas.

A tecnologia do controlador apresentado dedica-se somente às perdas no núcleo de um motor eléctrico.

As perdas no núcleo ou perdas em vazio correspondem à soma das energias gastas para energizar o estator e o rotor do motor. Estas perdas podem ser divididas em duas categorias: perdas por histerese e perdas por correntes de *Foucault* (*eddy current*). As perdas por histerese correspondem à energia gasta na orientação dos domínios magnéticos no processo de magnetização inicial do núcleo do motor; as perdas por correntes de *Foucault* são dissipadas sob a forma de calor quando existe circulação de correntes parasitas induzidas pela variação do campo magnético do núcleo.

A magnitude das perdas em vazio é proporcional ao quadrado da tensão aplicada no estator do motor, logo o controlador tenta minimizar a tensão aplicada ao motor quando o binário de carga é reduzido, não precisando da tensão de alimentação nominal (i.e. regime de carga parcial)

Quando o binário de carga é baixo, a tensão aplicada ao motor é reduzida de modo a reduzir as perdas no núcleo. À medida que vai sendo exigido maior binário de saída, correspondente ao aumento da carga, o controlador ajusta constantemente a tensão de alimentação do motor de modo a satisfazer os requisitos da carga (figura 6.3). Este ajuste é comandado pela monitorização do factor de potência, sendo assim determinada a fracção de potência a entregar ao motor, para este manter a sua velocidade.

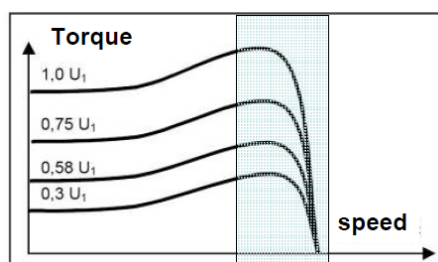


Figura 6.3 – Relação entre as curvas de binário-velocidade dos motores de indução e a tensão de alimentação [29].

O controlador usa um sistema de tiristores controlados electronicamente para efectuar este tipo de ajuste, assim como também são usados filtros passa-baixo e passa-alto e transformadores de isolamento, de modo a provocar o mínimo de interferência harmónica no sistema.

Este tipo de controlador é fundamentalmente usado para reduzir as perdas em vazio em aplicações que estejam sujeitas por longos períodos de tempo a um baixo regime de carga, não alterando a velocidade de saída do sistema.

6.1.3. Descrição da tecnologia da solução C (velocidade variável com optimização)

Este tipo de tecnologia contempla as duas anteriores, através de um variador electrónico de velocidade com realimentação, que monitoriza o factor de potência do motor de forma a otimizar a corrente de magnetização.

A parametrização deste tipo de dispositivos é exigente quer a nível de programação de parâmetros, quer de instalação.

6.1.4. Aspectos comparativos entre os dois tipos de tecnologias estudadas

Na tabela 6.1 são apresentadas as principais diferenças entre as tecnologias estudadas.

Tabela 6.1 — Comparação entre as diversas soluções de optimização estudadas [29].

	Solução A	Solução B	Solução C
Harmónicos	Gera harmónicos para o motor e para a rede	Operação puramente sinusoidal, não introduz harmónicos no motor nem na rede	Gera harmónicos para o motor e para a rede
Perdas internas	4 a 8 %	0,5 %	4 a 8 %
Regeneração de energia	Não, necessita de um equipamento extra	Sim	Não, necessita de um equipamento extra
Duração do motor	Reduz (circulação de corrente nos enrolamentos)	Aumenta	Reduz (circulação de corrente nos enrolamentos)
Robustez, imunidade a ruído	Sensível a ruídos	Bastante robusto	Sensível a ruídos
Períodos de poupança	Cerca de 15 a 25% do tempo de operação	Cerca de 95% do tempo de operação	Cerca de 95% do tempo de operação
Qualidade de onda	Degradada, introdução de harmónicos	Mantida	Degradada, introdução de harmónicos
Instalação	Requisitos elevados ao nível da parametrização	Relativamente simples	Requisitos elevados ao nível da parametrização
Operação em poupança	Necessita de sensores de movimento adicionais	Monitorização do factor de potência (incluída)	Necessita de sensores de movimento adicionais
Preço médio unitário (11kW)	700 €	400 €	1000€

6.2. Objectivos do teste

Os testes efectuados foram conduzidos com vista a verificar o real potencial de poupança das soluções de eficiência energética presentes actualmente no mercado, aplicados a um sistema em concreto.

Foram analisadas duas escadas rolantes; uma com funcionamento em sentido ascendente e outra com sentido descendente. Cada uma estava equipada com um motor eléctrico de indução trifásico de 11kW.

Foram medidos vários parâmetros eléctricos de cada motor - corrente, tensão, energia activa, energia reactiva e factor de potência - por forma a analisar o perfil de funcionamento de cada motor em regime normal.

Em simultâneo com a aquisição dos dados eléctricos foi monitorizado o tráfego de cada escada, através do dispositivo LIMPP.

Foi disponibilizado um controlador (solução C) para efectuar testes, através da monitorização dos parâmetros eléctricos com o controlador implementado.

Contudo, devido a contingências de ordem técnica, não foi possível realizar os testes.

No entanto, a análise do funcionamento dos controladores é assessorada por testes exaustivos efectuados aos mesmos em sistemas semelhantes.

Seria interessante, de facto, fazer o teste implementando o controlador no sistema em questão, fica a sugestão para um trabalho futuro.

6.3. Local de teste e dispositivos testados

Os dispositivos testados foram duas escadas rolantes, com sentidos de movimento distintos, ascendente e descendente.

As mesmas trabalham 13h por dia, 7 dias por semana e 365 dias por ano.

As escadas rolantes são do fabricante Schindler, que simultaneamente assegura a manutenção das mesmas.

Tabela 6.2 — Características da instalação.

Localização	Escada rolante nº 7	Escada rolante nº 8
Tipo motor	Indução trifásico	Indução trifásico
Fabricante	Schindler	Schindler
Modelo	SDS 35-100 K	SDS 35-100 K
Potência (kW)	11	11
Tensão (V)	380	380
Frequência (Hz)	50	50
Número de Fases	3	3
Número de Pólos	6	6
RPM	980	980
Data de fabrico	1995	1995

6.4. Procedimentos de teste

Os analisadores de energia foram instalados na sala de quadros do centro comercial, nomeadamente nos circuitos nº 13 e 18, correspondentes às escadas rolantes nº 7 e 8.

A instalação foi efectuada de acordo com a figura 6.4.

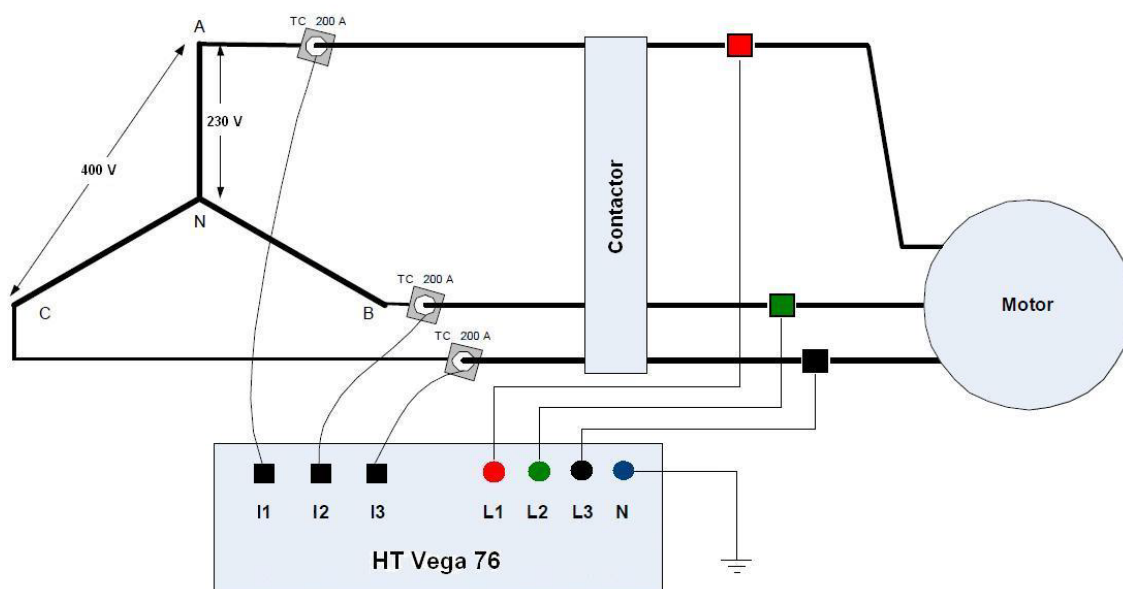


Figura 6.4 - Esquemático da ligação dos analisadores de energia

A instalação dos analisadores de energia permitiu capturar os diversos parâmetros eléctricos da escada rolante. A montagem no sítio em questão permitiu que fossem tomados em consideração todos os periféricos eléctricos da instalação, ou seja, a energia registada nos equipamentos é aquela que vai ser facturada, uma vez que a medição está a ser feita a montante de todos os dispositivos.



Figura 6.5 - Pormenor da montagem das pinças amperimétricas

Em simultâneo com os analisadores, foi instalado o dispositivo de monitorização de tráfego (LIMPP) nas zonas de passagem das escadas rolantes, mais concretamente no local indicado nas figuras 6.6 e 6.7.

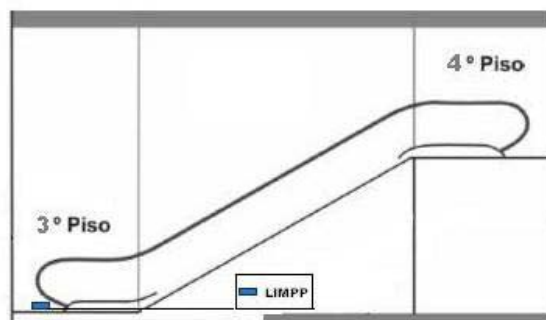


Figura 6.6 – Esquema da montagem LIMPP na escada rolante nº 7 (ascendente).

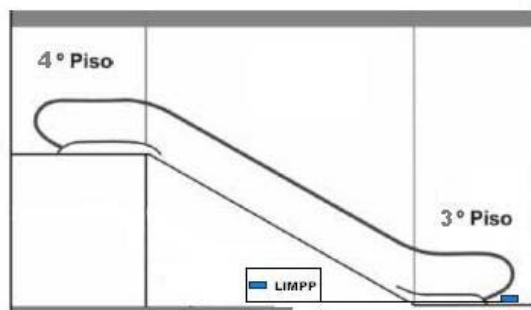


Figura 6.7 – Esquema da montagem LIMPP na escada rolante nº 8 (descendente).



Figura 6.8 – Pormenor da montagem do LIMPP.

Os relógios internos de todos os equipamentos instalados foram sincronizados, de modo a possibilitar uma análise comparativa de todos os dados adquiridos na instalação.

6.5. Instrumentação utilizada

As medições efectuadas estiveram a cargo de dois analisadores de energia HT Vega 76.

A corrente foi monitorizada em cada fase usando pinças amperimétricas de 200A.

O padrão de tráfego da instalação foi medido com o dispositivo LIMPP, descrito no capítulo 5.

A instrumentação usada encontra-se nas seguintes imagens:



Figura 6.9 – Pinça amperimétrica [47].



Figura 6.10 – Analisador de energia HT Vega 76 [48].

6.6. Condições de teste

Os testes foram realizados no centro comercial de 30/11/2008 a 08/12/2008. Os intervalos de medição dos analisadores de energia foram de 3 minutos, enquanto que os do LIMPP foram de 4 segundos.

Cada escada rolante foi monitorizada durante 7 dias em contínuo, de Domingo a Segunda-Feira e uma de cada vez, pois apenas estava disponível um dispositivo LIMPP.

As condições de tráfego foram normais durante todo o período de monitorização, no entanto, é relevante salientar que a época de testes correspondeu ao período de compras de Natal, o que pode ter causado uma maior afluência de pessoas.

A instalação e a remoção dos equipamentos foi efectuada pela equipa da Edifícios Saudáveis.

O tratamento dos dados foi exclusivamente efectuado pelo autor deste relatório.

6.7. Tratamento e análise de resultados

6.7.1. Escada rolante nº 7

A escada em questão assegura o tráfego ascendente entre o piso 3 (zona comercial) e o piso 4 (praça de alimentação).

É uma escada com um factor de utilização médio no universo do centro comercial.

Tem possibilidade de mudança de direcção mediante chave e possui botão de emergência acessível.

O arranque e a paragem são controlados pela gestão técnica e/ou mediante um interruptor com chave local.

O arranque está programado para as 10h00, hora em que começa a circulação dos lojistas pela zona comercial, desligando por volta das 23h.

Nas figuras 6.11 e 6.12 são apresentados os gráficos do factor de potência e da potência activa média da instalação em questão durante os 7 dias de análise.

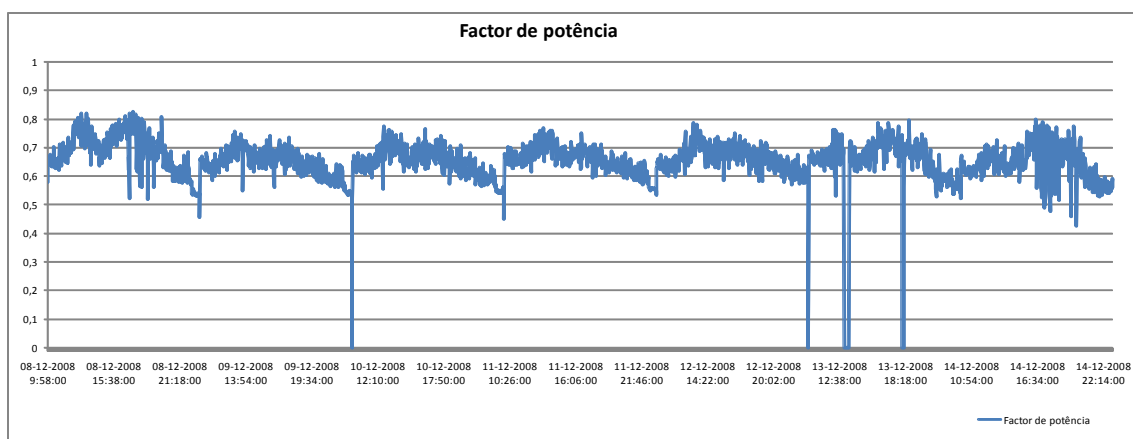


Figura 6.11 - Registo do factor de potência da instalação nº 7 durante os 7 dias de monitorização.

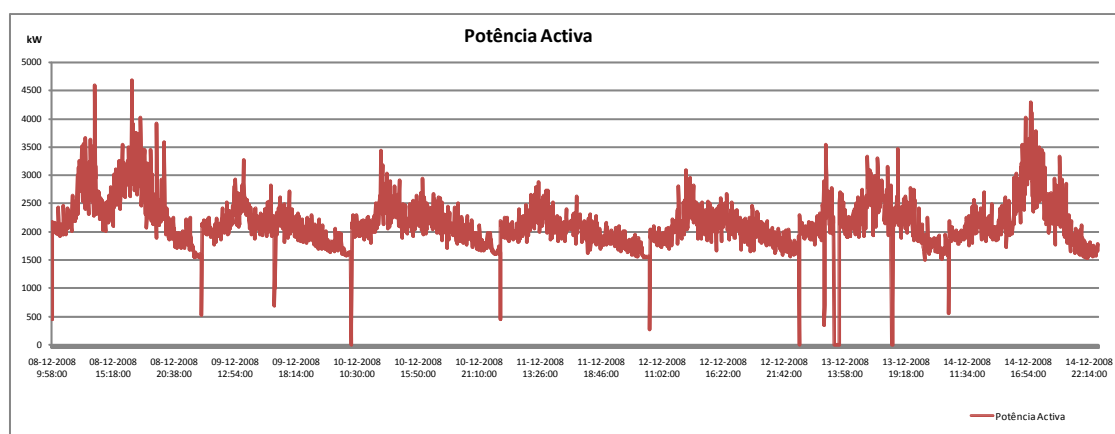


Figura 6.12 - Registo da potência activa da instalação nº 7 durante os 7 dias de monitorização.

Através dos gráficos, observa-se que o factor de potência segue o mesmo padrão de comportamento da potência activa.

Podemos ainda verificar que em todos os dias da análise foi observado o mesmo perfil de comportamento, sendo o pico de consumo atingido entre as 11h30 e as 14h30, período correspondente ao horário de almoço.

Na figura 6.13 é apresentado um gráfico da operação do dia 12 de Dezembro de 2008, onde se representa o factor de potência e o tráfego.

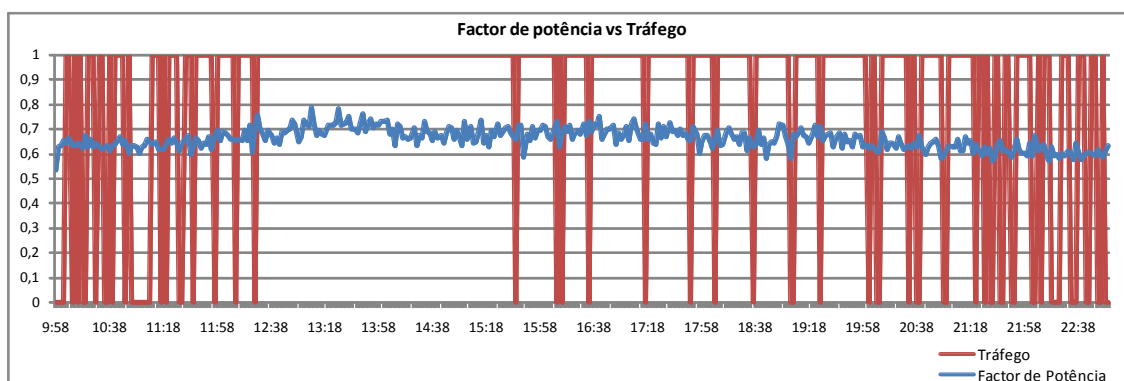


Figura 6.13 – Registo do factor de potência versus tráfego na instalação nº 7 durante um período do dia 12/12/2008.

O valor 0 de tráfego assinala que a escada poderia estar em regime de *standby*, ou seja, este estado foi alcançado porque os sensores do LIMPP não detectaram a presença de pessoas durante, pelo menos, 20 segundos. O valor 1 corresponde ao estado de actividade, sinal de que existiu sensibilização dos sensores do dispositivo.

Verifica-se uma relação entre a duração dos intervalos de actividade contínua e o valor do factor de potência, sendo que quanto maior for o intervalo de actividade, mais elevado é o factor de potência.

Sendo a escada nº7 uma escada ascendente, quanto mais passageiros estiverem em cima da escada, o que se pode extrapolar de alguma forma pela largura do intervalo, maior é o factor de potência do motor, pois é exigido maior binário motor.

6.7.2. Escada rolante nº 8

A escada rolante nº 8 assegura o tráfego descendente entre o piso 4 (praça de alimentação) e o piso 3 (zona comercial).

Tem possibilidade de mudança de direcção mediante chave e possui botão de emergência acessível.

O arranque e a paragem são controlados pela gestão técnica e/ou mediante interruptor com chave local.

O arranque está programado para as 9h00, sendo a primeira escada a ligar no centro para servir os lojistas e o resto do pessoal autorizado, cujo acesso é efectuado pelo cais/parque de estacionamento (piso 4 e superiores), assegurando o tráfego para a zona comercial.

Por outro lado, é a primeira escada a desligar no centro, às 22h00, hora em que a zona comercial encerra, permanecendo a praça de alimentação aberta até às 23h00, como tal, a escada é desligada para bloquear o tráfego da praça de alimentação para a zona comercial.

Nas figuras 6.14 e 6.15 são apresentados os gráficos do factor de potência e da potência activa média da instalação em questão durante os 7 dias de análise.

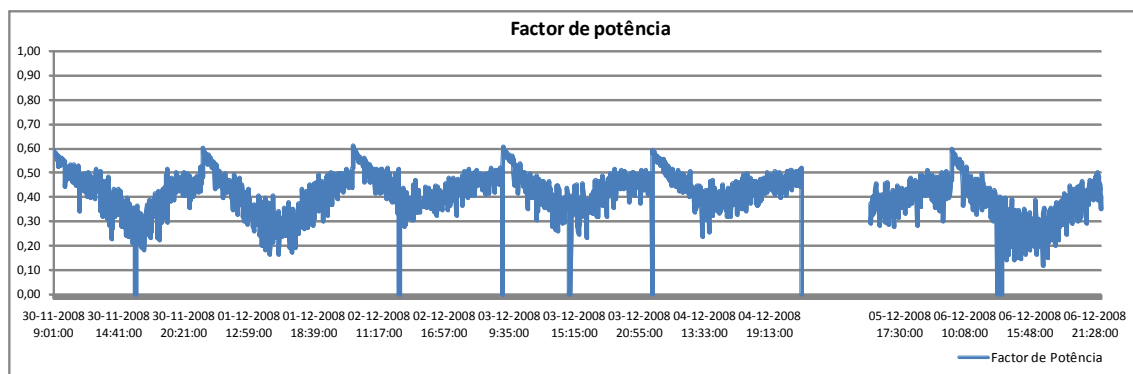


Figura 6.14 – Registo da potência activa da instalação nº8 durante os 7 dias de monitorização

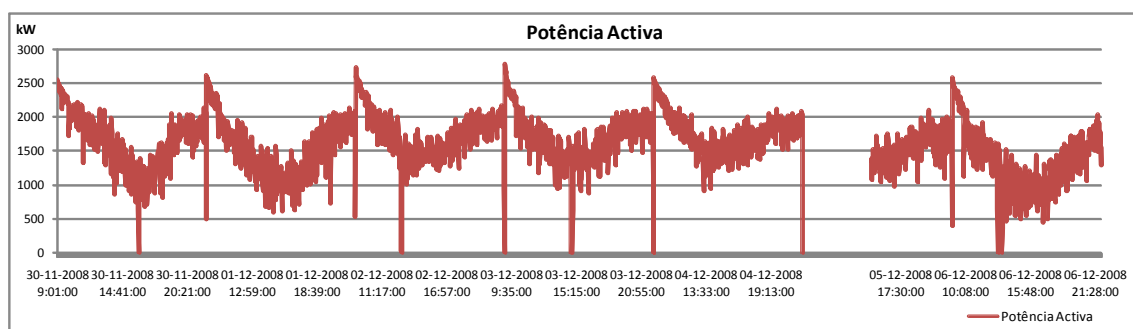


Figura 6.15 – Registo da potência activa da instalação nº 8 durante os 7 dias de monitorização

A falta de dados registada durante o período da manhã do dia 05/12/2008 esteve relacionada com problemas técnicos ocorridos no equipamento de medição.

Podemos observar também, à semelhança do que acontecia na instalação anterior, a relação entre a potência activa e o factor de potência.

O padrão diário também é semelhante durante os 7 dias de monitorização, correspondendo o pico de tráfego ao período compreendido entre as 13h00 e as 17h30 pois após o almoço, os utentes do centro deslocam-se da praça de alimentação para a zona comercial, tendo obrigatoriamente de passar pela escada em análise.

Na figura 6.16 é mostrado o gráfico resultante da medição no dia 01 de Dezembro de 2008.

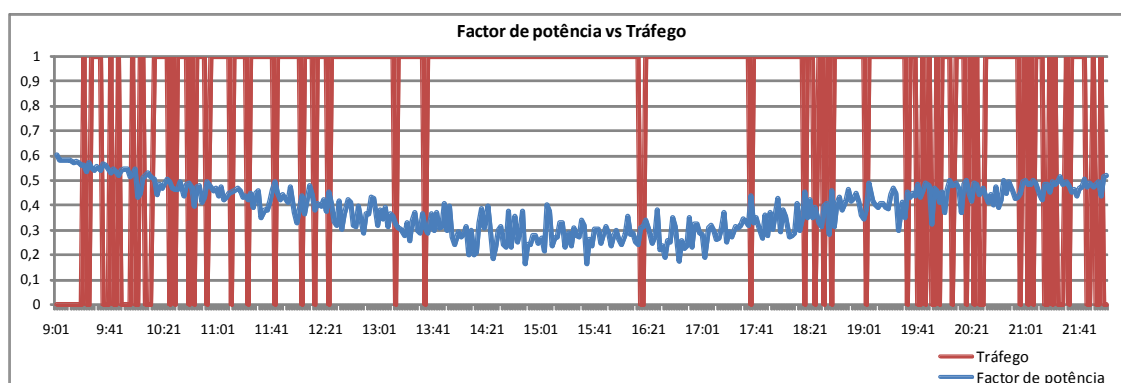


Figura 6.16 – Registo do factor de potência versus tráfego na instalação nº 8 durante o dia

01/12/2008

Pode-se constatar que o intervalo de actividade com maior largura corresponde ao período em que foi registado o menor factor de potência na escada. Isto acontece porque o fluxo elevado de passageiros origina uma força que contribui para o movimento descendente da escada, fazendo baixar o binário exigido ao motor e consequentemente baixa o factor de potência da instalação.

Inversamente, quando não existe fluxo de passageiros, ocorre uma subida do factor de potência.

Importa contudo salientar, que a correlação entre a actividade do LIMPP e a variação do factor de potência não é a melhor. Isto acontece porque a temporização que foi programada para assinalar o estado de *standby* é algo elevada comparativamente à taxa de afluência de pessoas em períodos de tráfego elevado. No entanto, poderia ter sido efectuada uma monitorização com a temporização regulada para o valor mínimo, de modo a reflectir a afluência de pessoas à instalação. Todavia, o âmbito inicial do teste era simular as condições reais de um sistema de gestão de energia, de modo a contabilizar o tempo que a escada poderia estar realmente em regime de *standby*.

6.8. Balanço da auditoria

Na tabela 6.3, é apresentado o balanço da operação semanal de cada escada, encontrando-se em anexo (Anexo I) informação mais detalhada de cada escada analisada.

Tabela 6.3 — Balanço da operação semanal das escadas rolantes auditadas

	Escada rolante nº 7	Escada rolante nº 8
Consumo diário (médio)	27,3 kWh	21,5 kWh
Factor de potência (médio)	0,65	0,35
Tempo total de operação	13 h	13 h
Tempo possível de <i>standby</i> (médio)	2,6 h	2,86 h

6.9. Soluções de eficiência energética estudadas

Após a auditoria efectuada, constatou-se que as escadas analisadas poderiam estar em *standby* em aproximadamente 20% do tempo que estão em funcionamento.

Foi também constatado que os motores das escadas analisadas trabalham com um regime de carga bastante reduzido, facto traduzido pelo baixo factor de potência registado.

A análise técnico-económica foi efectuada tendo em conta as 8 instalações existentes no centro, 4 ascendentes e 4 descendentes. O facto das escadas auditadas terem um factor de utilização médio-alto, fez com que a extrapolação dos dados recolhidos nas duas escadas, resultasse numa análise algo pessimista em termos de potencial de poupança.

6.9.1. Solução A (variação de velocidade)

O potencial de poupança da solução tipo A pode ser calculado através da equação 6.1 [49].

$$E = \frac{P \times t \times F}{3600} \quad (6.1)$$

Onde:

E= energia economizada (kWh)
 P = potência consumida pela escada em vazio (kW)
 t = tempo possível de *standby* (s)
 F = factor de poupança = 0,6 para um controlo em duas velocidades
 = 1 para um controlo do tipo on-off

A energia economizada com a implementação da solução A no universo do centro comercial está representada na tabela 6.4.

O potencial de poupança foi considerado tendo em conta a redução de velocidade para 0,2 m/s no modo de *standby*.

Os valores totais foram calculados admitindo que as 8 escadas existentes no centro possuem características de utilização iguais às da escada nº7 (ascendentes) e da escada nº8 (descendentes).

Tabela 6.4 — Poupanças relativas à solução A

	Escada nº 7	Escada nº 8	Total (8)
Potência consumida em vazio (kW)	2,5	2,5	20
Tempo possível em <i>standby</i> diário (s)	9360	10296	78624
Energia economizada (kWh/dia)	3,9	4,29	32,76
Economia de energia diária	14,2 %	20 %	16,7 %

6.9.2. Solução B (otimização em função da carga)

Os controladores deste tipo possuem um potencial de poupança baseado no factor de potência de uma instalação. Quanto menor o factor de potência da instalação, maior será a economia assegurada pelo dispositivo. A figura 6.17 mostra a variação do potencial de poupança em função do factor de potência.

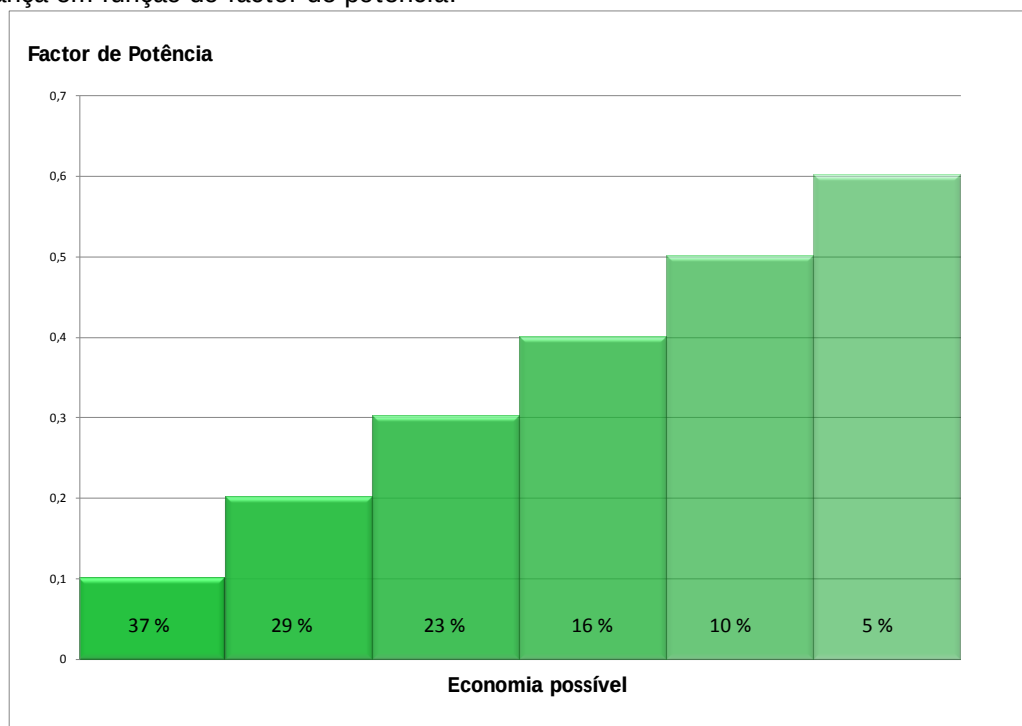


Figura 6.17 – Variação do potencial de poupança em função do factor de potência [50]

Na tabela 6.5 encontra-se o quadro resumo das poupanças alcançadas com a solução B.

Tabela 6.5 — Poupanças relativas à solução B

	Escada nº 7	Escada nº 8	Total (8)
Factor de potência médio	0,65	0,35	-
Energia economizada (kWh/dia)	1,1	5,5	26,4
Economia de energia diária	4 %	26 %	13,5 %

6.9.3. Solução C (variação de velocidade e otimização em função da carga)

A energia economizada com este tipo de solução corresponde ao somatório das economias das soluções anteriores, uma vez que este tipo de controlador integra os dois tipos de tecnologia.

Tabela 6.6 — Poupanças relativas à solução C

	Escada nº 7	Escada nº 8	Total (8)
Energia economizada (kWh/dia)	6,6	6,4	52
Economia de energia diária	24 %	30 %	26 %

6.9.4. Substituição dos motores existentes por novos com tecnologia de ímanes permanentes (PMSM)

Foi também estudada a viabilidade de substituir os motores existentes por motores da nova tecnologia de ímanes permanentes (PMSM). Foi requisitado um orçamento ao fabricante WEG, para 8 motores da sua nova linha *Wmagnet*. De referir que estes motores para funcionarem necessitam de um dispositivo variador de frequência que permite a mesma funcionalidade da solução C anteriormente estudada.

O orçamento dado foi de 3.000€ para o conjunto motor + variador. Importa salientar que ainda existem poucas soluções no mercado desta tecnologia, devido ao factor novidade. Isto poderá contribuir para o custo ainda bastante elevado.

Para o estudo económico, admitiu-se que este novo tipo de motores possui menos 25% de perdas que o motor de indução existente, conforme é indicado no capítulo 2.

Considerando que os motores existentes possuem uma potência nominal (P_n) de 11kW e um rendimento nominal de 87,5% (η_n), foi calculado o regime de carga através da equação 6.2, assumindo que a potência de entrada média ($P_{entrada}$) corresponde a 2,5 kW [41].

$$Carga = \frac{P_{entrada} \times \eta_n}{P_n} \quad (6.2)$$

Assim sendo, o regime de carga médio corresponde a $2,5 \times 0,875 / 11 = 20\%$.

De seguida foi calculada a potência de perdas neste regime de carga, sendo o rendimento interpolado (ver Anexo II), correspondendo a 79,1%.

$$P_{perdas} = \frac{P_{entrada}}{\mu} - P_{entrada} \quad (6.3)$$

A potência de perdas do motor corresponde a $((2,5 \text{ kW} / 0,791) - 2,5 \text{ kW}) = 0,66 \text{ kW}$.

A redução de potência de perdas com a substituição dos motores corresponde a $0,66 \text{ kW} \times 25\% = 0,16 \text{ kW}$. Assim sendo, em cada escada vão ser economizados $0,16 \text{ kW} \times 13\text{h} = 2,08 \text{ kWh/dia}$.

Somando a este valor a poupança relativa à solução C, necessária para o funcionamento do motor, alcançam-se os seguintes resultados:

Tabela 6.7 — Poupanças relativas à substituição dos motores por PMSM

	Escada nº 7	Escada nº 8	Total (8)
Potência reduzida em perdas (kW)	0,16	0,16	1,28
Energia economizada (kWh/dia)	8,68	8,48	68,6
Economia de energia diária	31,6 %	39,4 %	35 %

6.9.5. Conclusões

Após o estudo técnico-económico das soluções existentes no mercado para optimização do consumo de energia, concluiu-se que a implementação de algumas delas conduziria a poupanças de energia significativas possibilitando um rápido retorno do investimento. Na tabela 6.7 é mostrado o resumo de cada uma delas, tendo em conta a modernização de todas as instalações existentes no centro e que estas funcionam 365 dias por ano. Foi considerado um custo de 0,08€/kWh.

Foi também analisada a redução de emissão de CO₂ que cada uma destas soluções possibilitaria. Esta redução foi calculada tendo em conta a matriz energética de Portugal (portaria 63/2008) que emite 470 gramas de CO₂ por cada kWh de energia produzida.

Nestas instalações em particular, em operação há 13 anos, a solução mais indicada talvez fosse a substituição dos motores. A introdução de variadores de frequência não seria muito indicada, pois poderia causar problemas no isolamento dos enrolamentos dos motores, que possuem já alguma idade, devido à presença de harmónicos.

Tabela 6.8 — Quadro resumo do estudo técnico-económico das soluções de optimização estudadas.

Solução	Investimento inicial (€)	Poupança (kWh/ano)	Poupança (€/ano)	Retorno do investimento (anos)	Poupança (ton CO ₂ /ano)
A - variação de velocidade	5600	11957,4	956,6	5,8	5,6
B - optimização em função da carga	3200	9636	770,9	4,2	4,5
C - variação de velocidade + optimização em função da carga	8000	18980	1518,4	5,3	8,9
D - Substituição do motor (PMSM) + solução C	24000	25039	2003,12	11,9	11,8

Capítulo 7

Conclusões

7.1. Conclusões do projecto

O âmbito deste projecto visava avaliar e estudar a eficiência energética das instalações de transporte vertical.

Ao mesmo tempo, e como consequência da pesquisa na área, foi analisada a nova classificação internacional de eficiência dos motores eléctricos, que se revelou algo desajustada pois não abrange os novos motores de ímanes permanentes, que possuem a tecnologia necessária para exceder o nível máximo de eficiência. Esta nova tecnologia já é aplicada em elevadores desde 1996, permitindo um novo conceito de elevadores sem casa de máquinas e com um rendimento energético superior.

Os novos sistemas de regeneração de energia para elevadores também foram abordados, contudo é um assunto que deve ser analisado com algum cuidado, pois só em situações muito especiais é que trazem vantagens ao nível do consumo de energia. Os elevadores com um factor de utilização elevado e distâncias de viagem significativas são os alvos preferenciais destes sistemas regenerativos.

Em termos de procedimentos de análise, medição e estimativa do consumo de energia destas instalações, foram trocadas ideias valiosas com alguns dos elementos responsáveis pelo lançamento da actual norma de avaliação de desempenho (ISO/DIS 25745). Apesar da mesma possuir ainda algumas incongruências, está actualmente em curso um projecto, liderado pela Universidade de Coimbra, que prevê a criação de uma nova metodologia que responda às exigências, tornando-a mais adequada à realidade. Para isso, estão a ser efectuadas medições e testes em diversas instalações de transporte vertical.

A vertente mais prática deste trabalho surgiu da necessidade de estudar a aplicação de uma solução de eficiência energética numa instalação concreta de escadas rolantes. Foi lançado o desafio, que se traduziu no desenvolvimento e construção de um equipamento que monitorizasse o tráfego dessas instalações, de modo a avaliar de forma consistente a viabilidade de implementação das soluções existentes no mercado.

Constatou-se que através do ajuste do perfil de funcionamento de uma escada rolante é possível alcançar poupanças significativas no consumo de energia. Com a monitorização do factor de carga das mesmas escadas, possível através de analisadores de energia, identificou-se também uma possível área de intervenção. Nas instalações com níveis de carga muito flutuante, os novos controladores de factor de potência, passíveis de aplicar a motores eléctricos, permitem reduzir significativamente o consumo de energia, através da optimização da corrente de magnetização. Estes dispositivos são de fácil instalação quando comparados com os tradicionais variadores de tensão e frequência. O seu custo é reduzido, além de não afectarem a forma de onda nem introduzirem harmónicos na rede, que são os principais responsáveis pela degradação dos isolamentos dos motores e consequente redução da sua vida útil. Todos estes factores fazem com que estes dispositivos constituam a melhor solução para modernizar instalações de idade avançada.

7.2. Trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos seria interessante avaliar, na prática, as poupanças de energia alcançadas com a implementação dos novos motores de ímanes permanentes nas instalações de escadas e tapetes rolantes. Apesar de existirem já soluções no mercado deste tipo de motores ainda não são aplicados nestes sistemas de transporte, muito por culpa das filosofias inerentes à indústria do transporte vertical e também pelo factor novidade no mercado, deste tipo de motores.

Seria interessante também analisar as conclusões do projecto E4 que terminará no ano 2010.

Referências

- [1] Revista “Isto é”, edição 1830.
- [2] “World Energy Outlook”, International Energy Agency, 2008.
- [3] Direcção Geral de Energia e Geologia - DGE, Balanços energéticos, INE, Contas Nacionais Trimestrais.
- [4] *Energy-Efficient Elevators and Escalators*. Disponível em <http://www.e4project.eu/>. Acesso em 20 de Janeiro de 2009.
- [5] John Malinowski, “*Energy-efficient motors*,” in AccessScience @ McGraw-Hill, <http://www.accessscience.com>, DOI 10.1036/1097-8542. YB061840.
- [6] J.F. Fuchsloch, W.R. Finley and R.W. Walter, “*The next generation motor-designing a new approach to improve the energy efficiency of NEMA Premium motors*,” IEEE Ind. Appl. Magazine., Jan/Feb 2008.
- [7] IEC 60034-30 Ed.1.0
- [8] Conrad U. Brunner, “*International harmonization of motor standards saves energy*,” APEC Workshop, 3 December 2007, Beijing.
- [9] W. Sung, “*High Efficiency Machine Evaluation with SPEED*”, September 2008, pp.12
- [10] J. Malinowski, J.M. Cormick and K. Dunn, “*Advances in construction techniques of AC induction motors preparation for super-premium efficiency levels*,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 6, November/December 2004.
- [11] Austin.H. Bonnett and Chunck. Yung, “*Increased Efficiency versus Increased Reliability*,” IEEE Ind. Appl. Magazine., Jan/Feb 2008.
- [12] Disponível em [http://library.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/21e7a3bf740a9a45c125738e0037913a/\\$File/TM018%20EN%20Rev%20A%202007%20New%20IEC%2060034_2_1%20on%20efficiency%20lowres.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/21e7a3bf740a9a45c125738e0037913a/$File/TM018%20EN%20Rev%20A%202007%20New%20IEC%2060034_2_1%20on%20efficiency%20lowres.pdf). Acesso em 15 de Dezembro de 2009.
- [13] Disponível em <http://www.embedded-control-europe.com/prodnews?pid=122>. Acesso em 20 de Novembro de 2008.
- [14] International Energy Agency IEA Implementing Agreement, Efficient Electrical End-Use Equipment (4E), Annex: Electric Motor Systems. Draft 2 (revised after 8/9 November 2007 Interim-ExCo Meeting in Paris).
- [15] A. T. Almeida, “*Preparatory Study Electric Motors Preliminary Technical Analysis*” AP6 Workshop, EnergyUsingProduct(EuP) Directive, Beijing, June 10, 2007

- [16] Disponível em <http://www.ferret.com.au/c/SEW-Eurodrive/Cast-copper-induction-motor-drives-n704194>. Acesso em 24 de Janeiro de 2009.
- [17] Disponível em http://users.telenet.be/b0y/content/gen_techin/Induction.Motor.cutaway.jpg. Acesso em 24 de Janeiro de 2009.
- [18] Disponível em [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/defd439f36157816c2256f8e004d4c1e/\\$File/en_ACS800PermMagSynchSupplStd_b.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/defd439f36157816c2256f8e004d4c1e/$File/en_ACS800PermMagSynchSupplStd_b.pdf), pp.15-16. Acesso em 3 de Janeiro de 2009.
- [19] A.T. Almeida et al, "EUP Lot 11 Motors Final Report". Disponível em www.ecomotors/files/Lot11_Motors_FinalReport.pdf; Acesso em 12 de Janeiro de 2009.
- [20] Disponível em <http://www.stacoenergy.com/images/figure%201%20-%20power-factor-displacement-angle.jpg>. Acesso em 26 de Janeiro de 2009.
- [21] "Guidelines on Energy Efficiency of Lift & Escalators Installations", EMSD, 2007, pp. 12-13.
- [22] J. Puranen, "Induction Motor versus Permanent Magnet Synchronous Motor in Motion Control Applications: A Comparative Study", Dezembro 2006, pp. 52.
- [23] "Transportation systems in buildings", CIBSE Guide D, 2005.
- [24] Disponível em http://www.thyssen-aufzuege.de/uploads/news/70/BO61_400.jpg. Acesso em 11 de Dezembro de 2008.
- [25] Disponível em http://www.thyssen-aufzuege.de/uploads/news/70/Evo_classic_400.jpg. Acesso em 11 de Dezembro de 2008.
- [26] Disponível em http://construction.com/CE/CE_images/0709kone3.jpg.
- [27] G. Barney, "Towards low carbon lifts".
- [28] M. V. Guedes, "O Sistema Ward-Leonard", Resenha Histórica, 1995
- [29] T. Karwat, "Energy Savings in Motor Driven Systems", Bricks & Brits.
- [30] G. Barney, "Energy Efficiency of lifts - Measurement, Conformance, Modelling, Prediction and Simulation", 2007.
- [31] Doolard DA, "Energy Consumption of different types of lift drive system", Elevator Technology 4 (ed. G.C. Barney) (Stockport: IAEE Publications), 1992.
- [32] Elevatori, 2008, January/February, pp. 67-68.
- [33] ThyssenKrupp Velino, (PDF Catalog).
- [34] Schindler 9300 AE (PDF Catalog).
- [35] "Centro comercial padrão", Edifícios Saudáveis Consultores.
- [36] ISO/DIS 25745
- [37] G. Barney, "Energy Efficiency of lifts - Measurement, Conformance, Modelling, Prediction and Simulation", 2007, Guidance values
- [38] L. Al Sharif, "The General Theory of Escalator Energy Consumption with Calculations and Examples", Elevator World, May 1998, pp. 74-79.
- [39] G. Barney, "Energy Models for Lifts".
- [40] Urs Lindegger, Lift Power (PDF Document)
- [41] "Determining Electric Motor Load and Efficiency", Motor Challenge, U.S. Department of Energy.
- [42] VDI 4707 Guideline
- [43] Disponível em <http://www.vellemanusa.com/us/enu/product/view/?id=350693>. Acesso em 10 de Novembro de 2008.

- [44] Disponível em <http://home.cogeco.ca/~rpaisley4/LM555rcMonostable.GIF>. Acesso em 23 de Janeiro de 2009.
- [45] Disponível em http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012#tabs-product_page_tabs1-2. Acesso em 11 de Janeiro de 2009.
- [46] “*Installations of SinuMECs in Escalators*”, Power Electronics Systems, 2006
- [47] Disponível em <http://pdf.directindustry.com/pdf/elcontrol/options-catalogue/12305-42583-3.html>. Acesso em 29 de Dezembro de 2009.
- [48] Disponível em <http://images.isswww.co.uk/image.ashx?PhotoId=1204&Size=L>. Acesso em 27 de Dezembro de 2008.
- [49] “Service On-Demand Escalator”, EMSD
- [50] Powerboss Brasil, PowerPoint Presentation

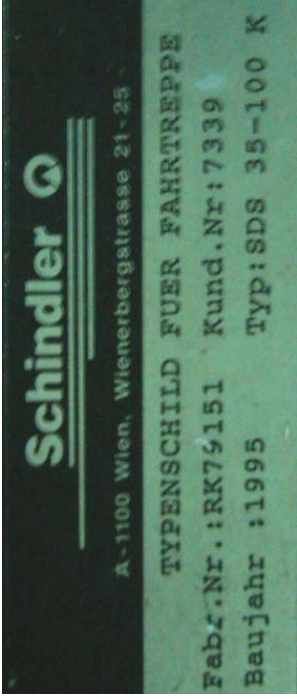
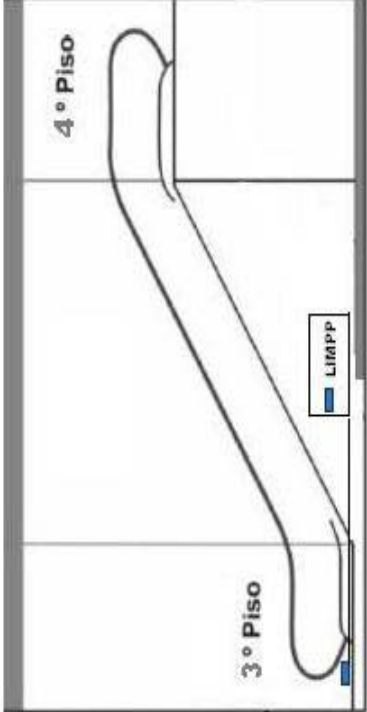
Anexo I

Escada rolante nº 7

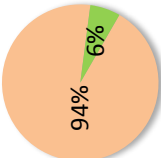
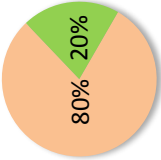
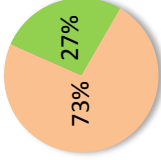
Marca: Schindler
Modelo: SDS 35-100 K
Ano: 1995

Características do motor de tracção:
Tipo: Indução trifásico
Potência nominal: 11 kW
Corrente nominal: 25.5 A
Tensão nominal: 380 V (trifásico)

Detalhes
Sentido: piso 3 -> piso 4 (ascendente)
Circuito de alimentação: nº 18 (sala de quadros)



Horário de funcionamento da escada rolante:
Início: 10h00
Fim: 23h00

Balanço operação diária		
Consumo total (mínimo)	26,10 kWh	
Consumo total (médio)	27,30 kWh	
Consumo total (máximo)	32,10 kWh	
Balanço diário LIMPP		
Mínimo	Médio	Máximo
		
		

Observações:

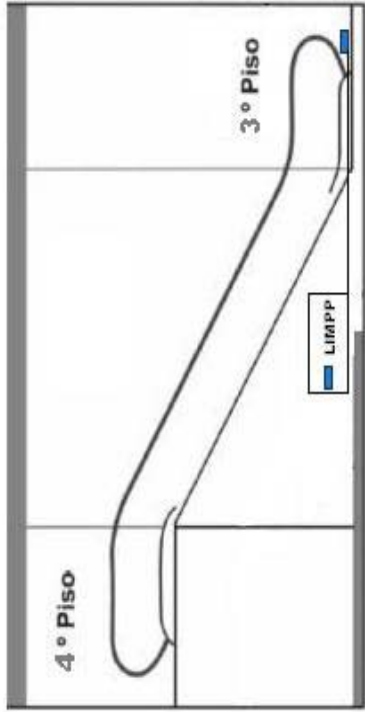
A escada rolante nº 7 assegura o tráfego ascendente entre o piso 3 (zona comercial) e o piso 4 (praça de alimentação). Tem possibilidade de mudança de direcção mediante chave. Possui botão de emergência acessível. O arranque/paragem são controlados pela gestão técnica e/ou mediante interruptor com chave local. O arranque está programado para as 10h00, quando começa a circulação dos lojistas pela zona comercial, desligando por volta das 23h.

Escada rolante nº 8

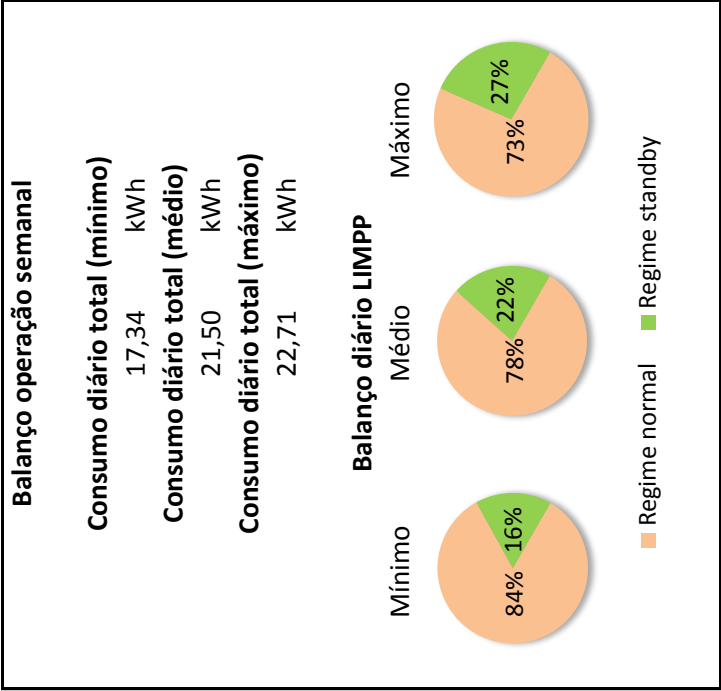
Marca: Schindler
Modelo: SDS 35-100 K
Ano: 1995

Características do motor de tracção:
Tipo: Indução trifásico
Potência nominal: 11 kW
Corrente nominal: 25.5 A
Tensão nominal: 380 V (trifásico)

Detalhes
Sentido: piso 4 -> piso 3 (descendente)
Circuito de alimentação: nº 13 (sala de quadros)



Horário de funcionamento da escada rolante:
Início: 9h00
Fim: 22h00



Observações:

A escada rolante nº 8 assegura o tráfego descendente entre o piso 4 (praça de alimentação) e o piso 3 (zona comercial).

Tem possibilidade de mudança de direcção mediante chave.

Possui botão de emergência acessível.

O arranque/paragem são controlados pela gestão técnica e/ou mediante interruptor com chave local.

O arranque está programado para as 9h00, sendo a primeira escada a ligar no centro para servir os lojistas e o resto do pessoal autorizado, cujo acesso é efectuado pelo cais/parque de estacionamento (piso 4 e superiores), assegurando o tráfego para a zona comercial.

Por outro lado, é a primeira escada a desligar no centro, às 22h00, hora em que a zona comercial encerra, permanecendo a praça de alimentação aberta até às 23h00, como tal, a escada é desligada para bloquear o tráfego da praça de alimentação para a zona comercial.

Anexo II

Efficiencies for 900 rpm, Standard Efficiency Motors								
Motor Size	Load Level In Percent							
	ODP				TEFC			
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
10	87.2	87.6	86.3	78.3	86.8	87.6	86.8	77.3
15	87.8	88.8	88.2	79.6	87.5	88.7	88.1	79.1
20	88.2	89.2	88.0	81.8	89.2	89.9	89.2	82.6
25	88.6	89.2	88.0	83.0	89.7	90.3	89.1	78.6
30	89.9	90.7	90.2	84.5	89.6	90.5	86.5	84.1
40	91.0	91.8	91.7	86.2	90.5	91.4	85.5	85.0
50	90.8	91.9	91.1	87.1	90.2	91.0	90.2	84.9
75	91.7	92.4	92.1	86.5	91.6	91.8	91.0	87.0
100	92.2	92.2	91.8	85.8	92.4	92.5	92.0	83.6
125	92.9	92.3	91.7	86.9	93.0	93.1	92.1	87.9
150	93.3	93.1	92.6	89.5	93.0	93.4	92.5	NA
200	92.8	93.5	93.1	NA	93.7	94.1	93.4	NA
250	93.1	93.5	93.0	NA	91.7	94.8	94.5	NA
300	93.1	93.7	92.9	92.7	94.4	94.2	93.7	NA