

Melhoria da Eficiência Energética nos Ascensores: a Recuperação de Energia

Miguel Leichsenring Franco

Julho de 2013

Sob a orientação de:

Professor Especialista Fernando Maurício Dias

No âmbito da unidade curricular de dissertação do
Curso de Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia
ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Resumo

A presente tese descreve diferentes soluções que permitem a reutilização da energia recuperada em ascensores eléctricos de roda de aderência dotados de conversores electrónicos de frequência e dessa forma contribuir para a melhoria da eficiência energética nos ascensores. Nos ascensores, a energia potencial é constantemente transferida enquanto a cabina está em movimento. Se a cabina se estiver a movimentar em sentido descendente com plena carga, ou em sentido ascendente, mas vazia, o motor estará em modo gerador. Quando a cabina se movimenta em sentido descendente, e o peso na cabina é superior ao peso do contrapeso, então o binário do motor encontra-se em sentido contrário à velocidade, isto é, o motor está a travar, havendo lugar à recuperação de energia. Igualmente, se a cabina subir vazia, também se poderá recuperar energia eléctrica. A energia acumulada em forma de energia potencial nas pessoas e no contrapeso pode ser recuperada, dado que o motor estará a funcionar como um gerador.

De modo a estudar a viabilidade técnica e económica das diferentes soluções foram realizadas medições a uma amostra representativa de ascensores eléctricos de roda de aderência. Esta amostra é constituída por 39 ascensores que estão instalados em diferentes tipos de edifícios e que pertencem a diferentes categorias de utilização, de acordo com a norma VDI 4707:2009. Para cada ascensor foi medida a energia consumida e a energia gerada para uma manobra completa – a descida e a subida da cabina sem carga. A partir das medições, e com base na norma VDI 4707:2009 foram calculados os valores anualizados de energia eléctrica consumidos e produzidos por cada ascensor.

A partir das 5 hipóteses identificadas para a utilização da energia recuperada (carregamento de bateria para alimentação dos circuitos em *stand-by*; carregamento de supercondensador para alimentação dos circuitos em *stand-by*; carregamento de supercondensador para alimentar o barramento DC; reinjecção da energia no barramento DC de um conjunto de ascensores em grupo; reinjecção da energia na rede eléctrica do edifício onde o ascensor está instalado) foi realizada a avaliação técnica e a avaliação económico-financeira para cada um dos ascensores.

Por último, foi desenvolvido um simulador que permite definir a solução de recuperação de energia que seja técnica e economicamente mais viável, para um dado ascensor eléctrico de roda de aderência instalado, mediante a introdução dos parâmetros técnicos do ascensor em avaliação.

Palavras-chave: ascensores eléctricos de roda de aderência, eficiência energética, recuperação de energia, armazenamento de energia.

Abstract

The present thesis describes different solutions that allow the reuse of the energy recovered in electrical lifts with traction wheel and equipped with electronic frequency converters, this way contributing to the improvement in energy efficiency of the lifts. In the lifts, the potential energy is constantly transferred while the car is in movement. If the car is moving downwards in full weight, or upwards, but empty, the engine is in generation mode. When the car is moving downwards, and it's weight is superior to the mass of the counterweight, then the torque is rotating in opposition to speed, ie, the motor is breaking, therefore recovering energy. Likewise, when the car is empty and moving upwards, energy can also be recovered. The energy stored in the form of potential energy in passengers and in the counterweight can be recovered, as the motor is working as a generator.

In order to study the technical and economical viability of the different solutions, measures were taken from a representative sample of electrical lifts. This sample includes 39 lifts installed in different types of buildings and belonging to different use categories, according to the norm VDI 4707:2009. For each lift the consumed and generated energy for a complete trip – car empty, upwards and downwards – was measured. Based on the measures and on the norm VDI 4707:2009 the annualized values of electrical energy consumed and produced were calculated for each lift.

Departing from the 5 hypothesis identified for the use of the energy recovered (battery charging to feed the circuits in *stand-by*, supercapacitor charging to feed the circuits in *stand-by* and DC bus; reinjection of the energy in the DC bus of a battery of lifts; reinjection of the energy in the building electrical network), a technical and economic assessment was undertaken for each lift.

Lastly, a simulator was developed, that allows the definition of the energy recovery solution which is technically and economically more viable for a given lift, through the introduction of the technical parameters of the lift being evaluated.

Keywords: electrical lifts, energy efficiency, energy recovery, energy storage.

Dedicatórias e Agradecimentos

À minha mulher e companheira de uma vida, Raquel, a minha fonte de inspiração, pelo apoio, motivação, paciência e pela minha ausência.

Aos meus filhos, Bernardo, Tomás, Rita, pela minha ausência. Que este projecto lhes possa servir de inspiração e de exemplo.

Aos meus pais, que me deram a vida, a educação, os valores e o exemplo.

Ao meu mestre e orientador, Engenheiro Maurício Dias, pelo seu incansável apoio, orientação, cuidado e incentivo.

Ao Engenheiro Pedro Melo, pelo seu apoio no desenvolvimento do modelo físico da recuperação de energia em ascensores.

À Dr^a Manuela Maia pelo seu apoio no tratamento estatístico dos dados.

Ao Filipe Silva e ao Jacinto Ferreira da Schmitt-Elevadores, Lda., pelo seu apoio na recolha e tratamento dos dados das medições e no desenvolvimento do modelo em *Matlab-Simulink*.

À Schmitt-Elevadores, Lda. que tornou este projecto realidade.

Porto, Julho de 2013

Miguel Leichsenring Franco

Índice

1. Introdução	
1.1 Objectivos e âmbito	Pág. 1
1.2 Relevância do tema	Pág. 1
1.3 Estrutura da Tese	Pág. 4
2. Estado da Arte	
2.1 Ascensores	Pág. 6
2.2 Sistemas de tracção para ascensores eléctricos com roda de aderência	
2.2.1 Máquina com redutor com motor assíncrono	Pág. 11
2.2.2 Máquina sem redutor com motor síncrono	Pág. 16
2.3 Conversores electrónicos de frequência	Pág. 19
2.4 Armazenamento de energia	Pág. 29
2.4.1 Baterias	Pág. 30
2.4.2 Condensadores	Pág. 37
2.4.3 Soluções mistas	Pág. 42
2.5 A eficiência energética nos ascensores	Pág. 42
2.5.1 A recuperação de energia	Pág. 48
2.5.2 Modelização física da recuperação de energia	Pág. 53
2.5.3 Normas sobre eficiência energética para ascensores	Pág. 58
2.5.3.1 VDI 4707	Pág. 59
3. Metodologia utilizada e caracterização do objecto de estudo	Pág. 61
3.1. Metodologia utilizada	Pág. 61
3.2. Caracterização do objecto de estudo	Pág. 70
4. Identificação de hipóteses de utilização da energia recuperada	Pág. 73
4.1 Hipótese 1: Carregamento de bateria: alimentação dos circuitos em <i>stand-by</i>	Pág. 77
4.2 Hipótese 2: Carregamento do supercondensador	Pág. 82
4.2.1 Situação 1: Alimentação dos circuito em <i>stand-by</i>	Pág. 82
4.2.2 Situação 2: Alimentação do barramento DC	Pág. 87
4.3 Hipótese 3: Reinjecção no barramento DC	Pág. 94
4.4 Hipótese 4: Reinjecção na rede eléctrica do edifício	Pág. 103
4.5 Hipótese 5: Reinjecção na rede eléctrica pública	Pág. 113
5. Desenvolvimento de um simulador de cálculo	
5.1. Introdução	Pág. 119
5.2. Desenvolvimento do simulador	Pág. 119
5.3. Validação do simulador	Pág. 122
6. Avaliação dos resultados	
6.1. Avaliação do grau de recuperação de energia	Pág. 123
6.2. Avaliação dos resultados das hipóteses estudadas	Pág. 125
7. Conclusões e linhas futuras de investigação	Pág. 128
Referências bibliográficas	Pág. 132

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Anexos

Anexo 1: Formulário de levantamento de dados para medições	Pág. 137
Anexo 2: Análise estatística dos dados obtidos através das medições	Pág. 138
Anexo 3: Modelização física da recuperação de energia	Pág. 139
Anexo 4: Modelização de um ascensor eléctrico com roda de aderência em <i>Matlab-Simulink</i>	Pág. 149

Índice de Figuras

Figura 1 -	Ascensor hidráulico	Pág. 7
Figura 2 -	Ascensor eléctrico de roda de aderência	Pág. 7
Figura 3 -	Máquina assíncrona de uma velocidade	Pág. 14
Figura 4 -	Máquina assíncrona de duas velocidades	Pág. 15
Figura 5 -	Máquina com motor síncrono com imanes permanentes	Pág. 18
Figura 6 -	Balanço energético de ascensores, consumo médio	Pág. 19
Figura 7 -	Esquema de um conversor electrónico de frequência	Pág. 21
Figura 8 -	Diagrama blocos de um conversor electrónico de frequência ..	Pág. 21
Figura 9 -	Pulsção sinusoidal obtida com técnica de modulação PWM ..	Pág. 23
Figura 10 -	Interligação: conversor electrónico de frequência e ascensor ..	Pág. 26
Figura 11 -	Forma de curva de aceleração e desaceleração	Pág. 27
Figura 12 -	Conversor electrónico de frequência	Pág. 27
Figura 13 -	Moderno conversor electrónico de frequência regenerativo	Pág. 29
Figura 14 -	Diagrama de Ragone	Pág. 30
Figura 15 -	Configuração do sistema misto bateria / supercondensador	Pág. 42
Figura 16 -	Os três modos de funcionamento da máquina de indução	Pág. 50
Figura 17 -	Quando o ascensor funciona em modo motor e modo gerador	Pág. 52
Figura 18 -	Carregamento de bateria e alimentação do comando	Pág. 78
Figura 19 -	Carregamento de supercondensador	Pág. 83
Figura 20 -	Solução sem recuperação de energia	Pág. 87
Figura 21 -	Solução com recuperação de energia	Pág. 87
Figura 22 -	Esquema DES 2.0	Pág. 89
Figura 23 -	Interligação DES 2.0	Pág. 89
Figura 24 -	Poupança de energia com o DES 2.0	Pág. 90
Figura 25 -	Curva de tensão barramento DC – DES 2.0.....	Pág. 90
Figura 26 -	Diagrama flutuação energética / ciclo temporal	Pág. 90
Figura 27 -	Aspecto do supercondensador DES 2.0	Pág. 90
Figura 28 -	Esquema de interligação de conversores	Pág. 95
Figura 29 -	Projecto de instalação da bateria de quadruplex	Pág. 99
Figura 30 -	Fotografia do edifício	Pág. 99
Figura 31 -	Medição no quadro de entrada da casa das máquinas	Pág. 100
Figura 32 -	Energia activa consumida pelos 4 ascensores (sem recup.)....	Pág. 101
Figura 33 -	Energia activa consumida pelos 4 ascensores (com recup.)....	Pág. 102

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Figura 34 -	Sistema: um conversor de alimentação e um de reinjecção	Pág. 105
Figura 35 -	Sistema: dois conversores de aliment. e um de reinjecção	Pág. 105
Figura 36 -	Sistema: vários conversores de aliment. e um de reinjecção ..	Pág. 106
Figura 37 -	Sistema: vários conversores de alimentação e de reinjecção .	Pág. 107
Figura 38 -	Esquema de instalação do sistema para 4 ascensores	Pág. 111
Figura 39 -	Esquema de instalação de um conversor de 1 ascensor	Pág. 112
Figura 40 -	Aspecto do armário de reinjecção	Pág. 112
Figura 41 -	Simulador: <i>Input</i> – Introdução de dados	Pág. 119
Figura 42 -	Simulador: Processamento de dados	Pág. 121
Figura 43 -	Simulador: <i>Output</i> – Relatório de avaliação	Pág. 122

Índice de Tabelas

Tabela 1 -	Categorias de utilização – VDI 4707:2009	Pág. 61
Tabela 2 -	Espectro de cargas – VDI 4707:2009	Pág. 61
Tabela 3 -	Classes de necessidades energéticas – <i>stand-by</i>	Pág. 63
Tabela 4 -	Classes de necessidades energéticas – manobra	Pág. 63
Tabela 5 -	Dimensão da população por categoria de utilização	Pág. 66
Tabela 6 -	Dimensão da amostra por categoria de utilização	Pág. 66
Tabela 7 -	Dados obtidos a partir das medições da amostra	Pág. 72
Tabela 8 -	Resultados da Hipótese 1: Carregamento de bateria	Pág. 81
Tabela 9 -	Características técnicas do supercondensador seleccionado ...	Pág. 84
Tabela 10 -	Resultados da Hipótese 2.2: Carregamento supercond.	Pág. 86
Tabela 11 -	Resultados da Hipótese 2.2: Carregamento supercond.	Pág. 93
Tabela 12 -	Resultados da Hipótese 3: Reinjecção barramento DC	Pág. 98
Tabela 13 -	Características técnicas dos ascensores instalados	Pág. 100
Tabela 14 -	Resultados da Hipótese 4: Reinjecção na rede do edifício	Pág. 110
Tabela 15 -	Resultados da avaliação do grau de recuperação de energia ...	Pág. 123
Tabela 16 -	Valor médio grau de recuperação por categoria de utilização ...	Pág. 124
Tabela 17 -	Valor médio grau de recuperação por carga nominal	Pág. 124
Tabela 18 -	Avaliação da viabilidade técnica e económica	Pág. 126

Lista de abreviaturas e siglas

A	Ampere
AC	Corrente alternada (de <i>alternated current</i>)
DC	Corrente contínua (de <i>direct current</i>)
EDLC	Electrochemical Double-layer Capacitors
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISO	International Organization for Standardization
PRA	Período de Recuperação Actualizado
PWM	Pulse Width Modulation
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Associação dos Engenheiros Alemães)
VAL	Valor Actual Líquido
V	Volt
W	Watt
W/kg	Watt por quilograma
Wh	Watt-hora
Wh/kg	Watt-hora por quilograma
Ω	Ohm

1. Introdução

1.1 Objectivos e âmbito

Esta tese de mestrado tem como objectivos:

1. Estudar o potencial de recuperação de energia em ascensores eléctricos de roda de aderência já instalados, mediante medições realizadas numa amostra relevante de ascensores;
2. Estudar diferentes soluções que permitam reutilizar a energia recuperada e dessa forma contribuir para a melhoria da eficiência energética nos ascensores;
3. Desenvolver um simulador que permita definir a solução de recuperação de energia que seja técnica e economicamente mais viável, para um dado ascensor eléctrico de roda de aderência instalado.

Pretende-se ainda contribuir para o desenvolvimento de soluções técnicas que permitam melhorar a eficiência energética em ascensores eléctricos de roda de aderência já instalados e retirar conclusões para o desenvolvimento de novos modelos de ascensores eléctricos de roda de aderência.

O âmbito do estudo incidirá apenas sobre ascensores eléctricos de roda de aderência¹ com conversores electrónicos de frequência² e que integram a carteira de manutenção da empresa Schmitt-Elevadores, Lda³.

1.2 Relevância do tema

A segurança, o conforto e o melhor aproveitamento do espaço disponível nos edifícios são os temas centrais com que a indústria de ascensores normalmente se preocupa no desenvolvimento de novas soluções de transporte vertical de pessoas e cargas. A eficiência energética não era discutida até há alguns anos. Contudo, o aumento substancial do custo da energia eléctrica associado à relevância da temática das alterações climáticas e à sustentabilidade, conduz ao rápido aumento de importância da temática da eficiência energética nos ascensores.

Por forma a dar cumprimento ao Protocolo de Quioto da Convenção-Quadro das Nações Unidas, no qual se definiu uma drástica redução das emissões globais de gases com efeito

¹ Porque representam, como se irá ver adiante, cerca de 90% dos 140.000 ascensores instalados em Portugal.

² Porque apenas com um conversor de frequência será possível recuperar a energia do sistema (ver ponto 2.5).

³ Para a realização das medições é necessário aceder aos equipamentos que estão à responsabilidade de uma empresa de manutenção de ascensores. Por uma questão de racionalidade económica optou-se por seleccionar equipamentos desta empresa.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

de estufa, a União Europeia emanou várias directivas que se relacionam directa ou indirectamente com a temática da utilização de energia. As mais importantes são entre outras, a Directiva 2010/31/UE de 19 de Maio de 2010 – “Desempenho energético de edifícios” e a Directiva 2009/125/CE de 21 de Outubro de 2009 – “Criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia”. Os ascensores não são referidos explicitamente nestas duas directivas, quando se aborda a temática do aumento da eficiência energética. Na Directiva 2010/31/UE são referidos essencialmente equipamentos técnicos dos edifícios como sistemas de aquecimento, climatização e iluminação, bem como sistemas de isolamento térmico dos edifícios. Na Directiva 2009/125/CE por sua vez, também não se indicam especificamente os ascensores, embora sejam referidos, por exemplo, os motores eléctricos, que farão parte integrante de um ascensor.

Segundo a Directiva 2010/31/UE, os edifícios representam cerca de 40% do consumo de energia total da União Europeia. Uma vez que este sector está em expansão espera-se nos próximos anos um aumento do consumo de energia por esta via. Os edifícios têm um forte impacto no consumo de energia a longo prazo, tendo-se concluído numa investigação realizada no âmbito desta directiva, que com um aumento da eficiência energética em edifícios se poderia reduzir em 42% as emissões de carbono provocadas pelos edifícios, bem como os custos energéticos relacionados.

Em 2012, as entidades oficiais europeias reconheceram que o objectivo de eficiência energética da União, definido em 2010, não estava em vias de ser cumprido, e que era necessária uma ação mais determinada para explorar o considerável potencial existente no que respeita a maiores economias de energia nos edifícios existentes. Assim, na mais recente directiva 2012/27/UE de 25 de Outubro de 2012 relativa à “eficiência energética”, estabelece-se um quadro comum de medidas de promoção da eficiência energética na União, a fim de assegurar a realização do grande objetivo da União que consiste em atingir 20% em matéria de eficiência energética até 2020. Para tal, os Estados-Membros deverão estabelecer uma estratégia a longo prazo para a mobilização de investimento na renovação de edifícios residenciais e comerciais, tendo em vista melhorar o desempenho energético do parque imobiliário. A taxa de renovação dos edifícios deverá aumentar, atendendo a que o actual parque imobiliário constitui o sector com maior potencial de economia de energia.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Os ascensores, fazendo naturalmente parte do edificado existente, apresentam (como se irá ver ao longo desta tese) um potencial de melhoria da sua própria eficiência energética, podendo contribuir para a melhoria do desempenho energético global de um edifício.

Mais recentemente, a 10 de Abril de 2013 foi publicada a Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013, que aprova o novo Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 (PNAEE 2016). Com este documento estratégico pretende-se tornar a eficiência energética numa prioridade da política energética portuguesa, tendo em conta que os incrementos na eficiência energética promovem a protecção ambiental e a segurança energética do país. O aumento da eficiência energética contribuirá ainda para a redução da despesa pública e para um uso eficiente dos recursos.

De acordo com um estudo da S.A.F.E – “Agência Suíça para a Utilização Eficiente da Energia”, (2005), os ascensores podem representar uma parte significativa do consumo de energia num edifício (o consumo energético de um ascensor pode representar em média 5% do consumo total de energia de um edifício de escritórios). Na Suíça estima-se que o somatório do consumo de energia dos cerca de 150.000 ascensores instalados represente cerca de 0,5% do total de 280 GWh de consumo energético anual do país.

De acordo com o projecto E4 - Energy Efficient Elevators and Escalators⁴, estima-se que os ascensores serão responsáveis por 3 a 8% do total de energia eléctrica consumida num edifício. Segundo este estudo, na Europa a 27 (EU27) terão sido instalados e estarão em operação cerca de 4,8 milhões de ascensores e 75000 escadas mecânicas e tapetes rolantes (Almeida et. al. 2010). Os autores estimam que substituindo e utilizando a melhor tecnologia disponível para todos os ascensores existentes, poder-se-iam obter poupanças de energia eléctrica na ordem dos 66%.

De acordo com este estudo, prevê-se que em Portugal estejam instalados cerca de 140.000 ascensores, dos quais 90% serão ascensores eléctricos de roda de aderência e 10% serão ascensores hidráulicos. Cerca de 70% dos ascensores estão instalados em edifícios residenciais, 15% em edifícios de escritórios, 8% em hotéis, 4% em hospitais, 2% em edifícios comerciais e os restantes 1% em outros tipos de edifícios, como terminais de transporte e unidades industriais.

⁴ Projecto E4 - Energy Efficient Elevators and Escalators – D2.2 – Country Report – Portugal.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Estima-se que todos os ascensores instalados em Portugal tenderão a consumir anualmente 713 GWh, o que representará cerca de 1,5% do consumo total de energia eléctrica em Portugal.

O consumo de energia eléctrica de um ascensor individual é relativamente baixo quando comparado com outros equipamentos eléctricos instalados num edifício, como por exemplo os sistemas de aquecimento, de arrefecimento, ventilação e iluminação. Mas perante o elevado número de ascensores instalados num país ou numa região, o consumo global dos equipamentos de elevação pode assumir uma grande relevância.

A procura de produtos mais eficientes em termos energéticos e de edifícios verdes aumentou. O aumento do custo da energia (eléctrica) e a maior sensibilidade da sociedade para as questões ambientais contribui também decisivamente para a procura de soluções mais eficientes do ponto de vista energético. A indústria de ascensores pretende responder a essa procura desenvolvendo soluções técnicas adequadas. Assim, através do estudo do potencial de recuperação de energia num ascensor e da análise de diferentes soluções que permitam reutilizar essa energia (como se irá ver à frente, na maior parte das situações, essa energia é dissipada numa resistência ou através da própria máquina na forma de energia calorífica), pretende-se contribuir para a melhoria da eficiência energética do mesmo.

1.3 Estrutura da Tese

Depois de um breve enquadramento no capítulo 1, far-se-á no capítulo 2 um levantamento do estado da arte relativamente a:

- a. ascensores, descrevendo-se o funcionamento de um ascensor eléctrico de roda de aderência;
- b. sistemas de tracção para ascensores eléctricos com roda de aderência;
- c. conversores electrónicos de frequência;
- d. soluções de armazenamento de energia eléctrica;
- e. eficiência energética nos ascensores, normas existentes e o fenómeno físico associado à recuperação de energia, modelizando-o.

No capítulo 3, descrever-se-á a metodologia utilizada e registar-se-á a amostra de ascensores que foram sujeitos a medições e apresentar-se-ão os resultados obtidos.

No capítulo 4 identificar-se-ão cinco hipóteses de recuperação de energia e respectiva aplicação.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

No capítulo 5 apresentar-se-á um simulador que permita definir qual a solução de recuperação de energia que seja técnica e economicamente mais viável para um dado ascensor eléctrico de roda de aderência.

No capítulo 6 far-se-á a avaliação dos resultados obtidos, quanto às cinco hipóteses de trabalho estudadas.

Por fim, no capítulo 7 apresentar-se-ão as conclusões bem como as linhas futuras de investigação.

2. Estado da Arte

Neste capítulo apresentar-se-ão as soluções actualmente disponíveis relativamente a:

- ascensores (ponto 2.1);
- sistemas de tracção para ascensores eléctricos com roda de aderência (ponto 2.2);
- conversores electrónicos de frequência (ponto 2.3);
- sistemas de armazenamento de energia eléctrica (ponto 2.4);

bem como os conhecimentos mais avançados sobre a temática da eficiência energética nos ascensores (ponto 2.5).

A análise do estado da arte sobre os temas acima referidos revela-se de grande importância para se poderem estudar soluções que permitam melhorar a eficiência energética nos ascensores através da utilização da energia recuperada.

2.1 Ascensores

De acordo com o Decreto-Lei nº 176/2008 de 26 de Agosto⁵, o ascensor é definido como sendo um “aparelho de elevação destinado a transportar pessoas, pessoas e carga ou unicamente carga, mediante a translação, entre diferentes níveis, de um habitáculo que se desloca ao longo de guias rígidas, cuja inclinação em relação à horizontal é superior a 15°, ou cujo trajecto no espaço é perfeitamente definido, devendo, ainda, no caso de se destinar unicamente a carga, o habitáculo ser acessível à entrada de pelo menos uma pessoa e equipado com comandos situados no seu interior ou ao alcance de qualquer pessoa que nele se encontre”.

Para poderem desempenhar a sua função de transportar pessoas e/ou cargas entre diferentes pisos de um edifício, os ascensores são equipados com sistemas de tracção eléctricos e dessa forma utilizam energia eléctrica para poderem operar.

Em função do sistema de tracção, os ascensores podem ser subdivididos em duas grandes categorias:

⁵. O Decreto-Lei nº 176/2008 de 26 de Agosto transpõe, parcialmente, para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/42/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 17 de Maio, relativa às máquinas, e que altera a Directiva n.º 95/16/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de Junho. Por sua vez o Decreto-Lei n.º 295/98, de 22 de Setembro, introduziu na legislação nacional os mecanismos gerais de segurança a que devem obedecer os ascensores e respectivos componentes de segurança, definindo os requisitos necessários à sua colocação no mercado, transpondo para o direito interno a Directiva n.º 95/16/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de Junho, relativa à aproximação das legislações dos Estados membros respeitantes aos ascensores

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

1. Ascensor hidráulico (ver figura 1): ascensor para o qual a energia necessária à elevação da carga é transmitida por uma bomba accionada electricamente (agregado), que introduz um fluido hidráulico (óleo) num cilindro / pistão, que actua directa ou indirectamente na cabina.
2. Ascensor eléctrico de roda de aderência (ver figura 2): ascensor em que os cabos são accionados por aderência nos gornes da roda de tracção da máquina com motor eléctrico com ou sem redutor.

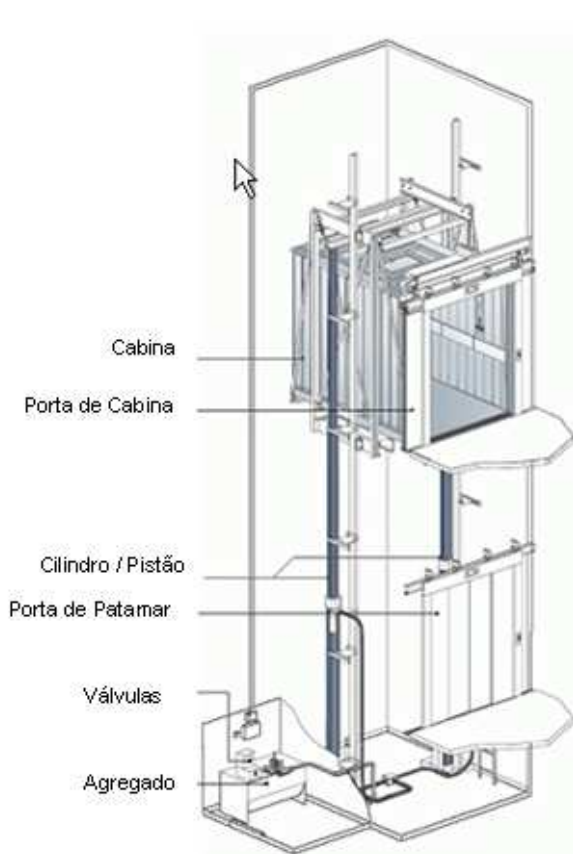


Figura 1 – Ascensor hidráulico
Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores

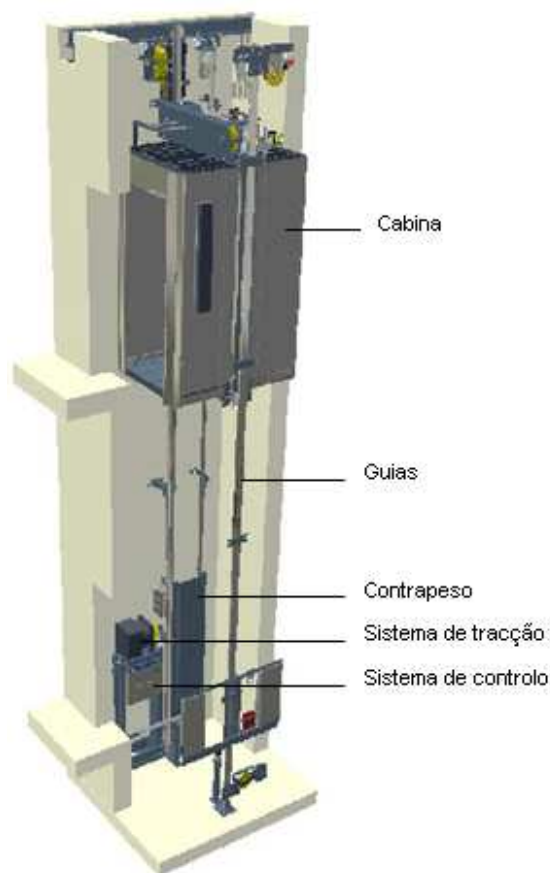


Figura 2 – Ascensor eléctrico de roda de aderência
Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores

Um ascensor eléctrico com roda de aderência⁶ é constituído pelos seguintes componentes principais⁷:

1. **Meios de suspensão para a cabina e para o contrapeso:** tradicionalmente são utilizados os cabos de aço, que apresentam diferentes diâmetros e quantidades, em função das cargas a movimentar. Mais recentemente foram introduzidas cintas de

⁶ Uma vez que o presente estudo apenas incide sobre os ascensores eléctricos com roda de aderência, só se irá descrever os componentes principais de um ascensor desta categoria.

⁷ Esta apresentação detalhada é importante para mais tarde se perceber melhor o fenómeno físico subjacente à recuperação de energia nos ascensores.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

tracção, que são compostas por cabos de aço revestidas a borracha ou a material sintético.

A cabina e o contrapeso são suspensos por intermédio de cabos de aço. Os cabos do elevador são amarrados na arcada superior da cabina ou passam por rodas de desvio instaladas na arcada superior da cabina, quando a suspensão é distinta de 1:1⁸. Normalmente é previsto um dispositivo para igualizar a tensão dos cabos de tensão, numa das pontas.

2. **Sistema de tracção:** normalmente é constituído por motor eléctrico, redutor mecânico⁹, sistema de travagem, roda de tracção, acoplamentos, veios, mancais e rolamentos e o respectivo chassis da máquina.

A transmissão da potência é realizada através da roda de tracção para os cabos de suspensão. A força de tracção é iniciada com a fricção entre os cabos e os gornes da roda de tracção. Existem vários tipos de suspensão, dependendo a sua aplicação das condições do local de instalação da máquina de tracção, da carga nominal e da velocidade nominal pretendida.

Existem dois tipos de sistemas de tracção para ascensores eléctricos de roda de aderência: máquinas com redutor e máquinas sem redutor¹⁰.

O redutor, quando existente, é utilizado para transformar a relação binário-velocidade de um motor, e encontra-se instalado entre o motor e a roda de tracção. O redutor é constituído por componentes móveis que causam atrito e dessa forma perdas energéticas.

Nos ascensores eléctricos com casa de máquinas, a máquina fica localizada normalmente na casa de máquinas por cima, na vertical da caixa do ascensor. Esta solução facilita a aplicação do sistema de suspensão mais simples em 1:1 e reduz o impacto que as forças exercem sobre a estrutura do edifício.

Por vezes, e devido à distância entre o centro de amarração da cabina e o centro de amarração do contrapeso, é necessário prever uma roda de desvio como

⁸ Na suspensão em 2:1 ocorrerá uma desmultiplicação de forças (redução para metade).

⁹ No final da década de 90 do século passado foram introduzidas na indústria de ascensores as máquinas sem redutor com motores síncronos, por imanes permanentes.

¹⁰ A máquina é dotada de um redutor para reduzir a velocidade da cabina, sendo constituída por um motor, um sistema de travão, um redutor e uma roda de tracção. O redutor mais comumente utilizado é o redutor de sem fim com roda de coroa, que é relativamente ineficiente face a outras soluções como os redutores helicoidais.

A máquina sem redutor é constituída por um motor, pelo sistema de travão e pela roda de tracção. A roda de tracção é acionada directamente pelo motor, eliminando-se dessa forma as perdas mecânicas de transmissão provocadas pelo redutor. Dado que o motor e a roda de tracção rodam à mesma velocidade, o motor terá de rodar a uma muito baixa velocidade – a velocidade no cabo de tracção será igual ao produto entre o diâmetro da roda de tracção e a velocidade angular do motor. Por exemplo, para uma velocidade nominal de 5 m/s e um diâmetro de roda de tracção de 750mm, a velocidade necessária para o motor será de apenas 128 rotações por minuto.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

complemento à roda de tracção. Desta forma reduz-se a perda do ângulo de abraçamento.

Nos ascensores eléctricos sem casa de máquinas, a máquina é instalada dentro da própria caixa do ascensor, no topo da mesma ou no piso inferior.

3. **Cabina**, ou habitáculo: onde são transportadas as pessoas e/ou cargas. A cabina é constituída normalmente por uma arcada interligada aos meios de suspensão, uma plataforma que forma o chão da cabina e que directamente suporta a carga, o tecto da cabina e os painéis laterais da cabina. Os componentes mecânicos associados são os tirantes de suspensão, as roçadeiras para guiar a cabina ao longo das guias instaladas na caixa do ascensor, o sistema de pára-quedas e a porta de cabina e respectivo operador de porta.
4. **Contrapeso**: é utilizado para contrabalançar a massa total da cabina e uma parte da carga nominal. Embora não exista nenhuma imposição legal, normalmente é prática na indústria que essa parte da carga nominal seja estipulada em 50% da carga nominal da cabina. Com o contrapeso pretende-se manter uma tensão adequada no sistema de suspensão por forma a garantir uma adequada aderência entre os cabos e a roda de tracção. Igualmente procura-se garantir um nível aproximadamente constante de energia potencial no sistema, reduzindo substancialmente o consumo energético.
Dado que o contrapeso é sempre mais pesado do que a cabina vazia, o ascensor consumirá menos energia quando a cabina se movimentar em sentido ascendente (a cabina será “puxada” pelo contrapeso). Analisando a situação oposta em que a cabina está na sua carga nominal máxima e em sentido ascendente, o motor terá de fornecer tracção adicional, dado que o somatório da carga nominal da cabina e da massa total da cabina excede a massa do contrapeso. Este tema será abordado em detalhe no ponto 2.5.1.
5. **Caixa do ascensor**: espaço completamente ou parcialmente fechado, que se estende desde o poço até ao telhado do edifício, dentro do qual a cabina e o contrapeso se movimentam. Está equipada com as guias de cabina e do contrapeso, bem como com as portas de patamar e os amortecedores no poço.
6. **Pára-quedas**: componente mecânico utilizado para parar e segurar a cabina e/ou o contrapeso nas guias em caso de rotura ou alongamento dos cabos ou se a velocidade da cabina à descida ou à subida ultrapassar num determinado valor (a velocidade nominal estipulada). A acção de travagem do sistema de pára-quedas é

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

inicializada pelo limitador de velocidade, que normalmente se encontra instalado na casa de máquinas ou dentro da caixa.

7. **Amortecedores:** componentes instalados no poço da caixa do ascensor por baixo da zona de impacto da cabina e do contrapeso, com o objectivo de limitar a deslocação da cabina e do contrapeso. Os amortecedores podem ser em poliuretano, em mola de aço ou com óleo, em função da velocidade nominal estipulada e são dimensionados para acumular ou dissipar a energia cinética da cabina ou do contrapeso.
8. **Portas de patamar:** em cada acesso servido pelo ascensor, são instaladas portas (automáticas ou semi-automáticas) que evitam que os utilizadores ou as cargas possam cair dentro da caixa do ascensor. Apenas quando a cabina está ao piso é possível abrir a porta de patamar. Tal é assegurado por um encravamento mecânico especial. No caso das portas automáticas, é a própria porta de cabina que com o seu motor procede à abertura e ao fecho da porta de patamar.
9. **Instalação Eléctrica:** inclui todos os equipamentos eléctricos de segurança, de comando e de iluminação na caixa e na casa de máquinas (quando existente).
10. **Sistema de Controlo:** sistema de comando composto pelo autómato de arquitectura modular e programável, pelo circuito de potência, e pelo conversor electrónico de frequência (quando existente¹¹), e que permitirá gerir todas as chamadas dos patamares bem como de dentro da cabina do ascensor.

Os parâmetros básicos normalmente utilizados para a definição técnica de um ascensor são: carga nominal Q (em kg), número de passageiros, velocidade nominal v (em m/s), curso (em m), quantidade de pisos a servir, quantidade de acessos e sua localização, dimensões da caixa (em mm), dimensões da cabina (em mm), localização da casa de máquinas (se existente), tensão de alimentação (em V), número de manobras / hora, tipo de sistema de controlo, tipo e dimensão (em mm) das portas de patamar e de cabina e condições ambientais de instalação. Para efeitos de cálculo dever-se-á considerar para um passageiro uma massa de 75 kg (de acordo com a norma NP EN 81-1:2000).

Se até final dos anos 90 do século passado todos os ascensores eléctricos com roda de aderência instalados tinham de possuir uma casa de máquinas (que resultava de uma

¹¹ A grande maioria dos ascensores instalados em Portugal antes do ano 2000 não eram dotados de conversores de frequência.

imposição legal), com a introdução da directiva ascensores¹² passou a ser possível a instalação de ascensores sem casa das máquinas. Hoje, mais de 90% dos ascensores instalados em Portugal e na Europa, são ascensores eléctricos sem casa de máquinas por roda de aderência. O surgimento das máquinas sem redutor veio permitir reduzir o espaço necessário na caixa e reduzir o ruído de funcionamento dos ascensores. Actualmente, e com o lançamento dos últimos modelos das principais marcas de fabricantes de ascensores no início dos anos 2000, 95% de todos os ascensores sem casa de máquinas eléctricos com roda de aderência são dotados de máquinas sem redutor (de acordo com dados da empresa Schmitt-Sohn Elevadores).

2.2 Sistemas de tracção para ascensores eléctricos com roda de aderência

Assistiu-se ao longo dos anos a uma evolução dos sistemas de tracção para ascensores eléctricos com roda de aderência, desde os motores de indução com redutor até às mais recentes máquinas sem redutor com motores síncronos de ímanes permanentes. É importante proceder a uma breve descrição das soluções utilizadas ao longo dos anos, porque uma parte substancial ainda hoje se mantém em funcionamento. Como se irá ver no capítulo 4, será possível através da aplicação posterior de um conversor de frequência recuperar energia¹³ mesmo a partir de máquinas com redutor e motor assíncrono de uma só velocidade.

2.2.1 Máquina com redutor com motor assíncrono

“O motor assíncrono¹⁴ baseia o seu princípio de funcionamento na criação de um campo magnético rotativo. A partir da aplicação de tensão alternada no estator, consegue-se produzir um campo magnético rotativo – campo girante – que atravessa os condutores do rotor. Este campo magnético variável induz no rotor forças electromotrizes que, por sua vez, criam o seu próprio campo magnético girante. Este campo magnético girante criado pelo rotor, ao tender a alinhar-se com o campo girante do estator, produz um movimento de rotação no rotor. A velocidade de rotação do rotor é ligeiramente inferior à velocidade de

¹² Directiva 1995/16/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho de 1995, transposta para direito nacional pelo Decreto-Lei 295/98 de 22 de Setembro, e alterada pela Directiva 2006/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de Maio e transposta para a ordem jurídica interna pelo Decreto-Lei nº 176/2008.

¹³ Importa aqui referir o produto – *Liftcomfort* - que foi lançado pela empresa Schmitt+Sohn Elevadores, Lda em 2009 e que resultou da necessidade de se dotar os ascensores existentes com um conversor de frequência, sem mudar o sistema de tracção originalmente instalado. Trata-se de um quadro autónomo com um conversor de frequência, que pode ser interligado ao quadro de comando do ascensor e à máquina de uma ou duas velocidades existente. Foi desenvolvido com base num estudo realizado na empresa (Franco e Ferreira, 2009).

¹⁴ Ou também referido como motor de indução.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

rotação do campo girante do estator, não estando por isso o rotor sincronizado com esse campo girante.” (Alves, 2003, p. 26 ss.). Segundo Beleza Carvalho (2008), o motor assíncrono é uma máquina essencialmente de velocidade constante, alimentado por uma fonte de energia eléctrica de tensão e frequência constantes. A velocidade de funcionamento no regime nominal é muito próxima da velocidade síncrona. Se o binário da carga aumentar, a velocidade do motor decrescerá ligeiramente.

O motor assíncrono pode ser classificado quanto ao tipo de rotor, em motor de rotor bobinado¹⁵ e em motor de rotor em gaiola de esquilo¹⁶.

O motor assíncrono com rotor em gaiola de esquilo é de construção mais simples, mais económico e mais robusto do que o motor de rotor bobinado, apresentando diversas vantagens, nomeadamente o facto de não ter anéis colectores nem escovas.

A simplicidade construtiva, a robustez resultante e o seu mais baixo custo fizeram do motor assíncrono com rotor em gaiola de esquilo o único tipo de motor assíncrono utilizado nos ascensores da carteira de manutenção da Schmitt-Elevadores, Lda. Assim, sempre que no âmbito desta tese forem referidos motores assíncronos, estes serão motores assíncronos de rotor em gaiola de esquilo.

A relação entre a velocidade do rotor (n), a velocidade síncrona do campo girante (n_s), o deslizamento (s), que será a diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona, a frequência da corrente (f) e o número de par de pólos da máquina (p) é dada pela seguinte expressão:

$$n = (1 - s)n_s = (1 - s)\frac{f}{p}$$

Beleza Carvalho (2008) propõe os seguintes métodos para a regulação da velocidade dos motores assíncronos:

1. Variação do número de pares de pólos: dado que a velocidade de funcionamento da máquina é próxima da velocidade de sincronismo, a velocidade do motor pode ser variada pela alteração do número de pares de pólos da máquina, que é conseguida alterando as ligações da bobinagem do estator. Este método é muito utilizado no

¹⁵ De acordo com Beleza Carvalho (2008), no rotor bobinado, a bobinagem desenvolve-se da mesma forma que a bobinagem do estator. Os terminais da bobinagem do rotor são ligados a três anéis colectores. Através da utilização de escovas fixas, premidas contra os anéis colectores, os terminais da bobinagem do rotor ficam acessíveis ao circuito exterior. Será assim possível introduzir uma resistência trifásica no circuito rotórico, com a finalidade de controlar a velocidade do motor de indução.

¹⁶ O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de cobre ou alumínio (condutores), dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, também em cobre ou alumínio, que curto-circuitarão os condutores.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

motor de rotor em gaiola de esquilo, pois o rotor pode operar com qualquer número de pares de pólos do estator. Este método apenas permite variar a velocidade em escalões.

2. Controlo pela frequência: a velocidade do motor assíncrono é proporcional à frequência da rede de alimentação. Deste modo utilizando conversores de frequência é possível alimentar o motor com uma gama alargada de frequências e desse modo obter diferentes velocidades de funcionamento para o motor. Neste método de controlo de velocidade, o deslizamento será baixo e o rendimento do motor elevado, uma vez que a velocidade de funcionamento estará muito próxima da correspondente velocidade síncrona.
3. Controlo pela resistência rotórica: apenas aplicável em motores de rotor bobinado, a velocidade pode ser controlada pela introdução de uma resistência exterior no circuito rotórico, através do sistema de escovas e anéis. Este método apresenta um baixo rendimento às menores velocidades devido aos elevados deslizamentos associados.

Apresentam-se em seguida três aplicações de máquinas de indução utilizadas na indústria de ascensores e que ainda se encontram instalados em ascensores da carteira da Schmitt-Elevadores, Lda.

Máquina com redutor e motor assíncrono de uma velocidade:

Os ascensores correntes instalados em edifícios não muito altos eram equipados nos anos de 1970 e 1980 com máquinas constituídas por motores assíncronos de indução de uma só velocidade. O motor de indução permitia uma velocidade constante, sendo alimentado por uma fonte de energia eléctrica de tensão e frequência constantes. A sua velocidade de funcionamento em regime nominal era muito próxima da velocidade síncrona¹⁷. Quando o binário da carga aumentava, a velocidade do motor decrescia apenas ligeiramente.

Estes motores arrancavam frequentemente ligados directamente à fonte de alimentação, absorvendo uma elevada corrente de arranque, tipicamente 4 a 8 vezes a corrente absorvida quando o motor funciona em plena carga.

Por forma a reduzir a intensidade no período de arranque, foi adoptado ainda o método de arranque estrela-triângulo. A ligação em funcionamento normal da bobinagem do motor era em triângulo. Na fase do arranque, contudo, a bobinagem era colocada em estrela, havendo

¹⁷ Para este tipo de motores a velocidade do motor em regime permanente é inferior à velocidade síncrona.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

lugar a uma menor corrente absorvida – o motor ligado em estrela absorve da rede uma corrente que é $\frac{1}{3}$ da corrente absorvida quando ligado em triângulo. Quando o motor se aproximava da velocidade nominal, a bobinagem era novamente colocada em triângulo.

Para parar a cabina do ascensor, o contactor desligava a alimentação eléctrica e o travão da máquina era imediatamente activado ainda com a máquina em movimento à velocidade nominal (tipicamente 0,6 m/s), o que provocava um elevado desgaste nas cintas do travão. Com a variação da carga na cabina, a temperatura e o estado do travão, por vezes não se conseguia garantir uma paragem nivelada com o piso (surgia um “ligeiro” degrau, que é muitas vezes fonte de queda de pessoas).

Estas máquinas tinham como grandes vantagens uma elevada robustez com reduzida manutenção. Na figura 3 apresenta-se um exemplo de uma máquina com redutor e motor assíncrono de uma velocidade da marca Schmitt+Sohn .

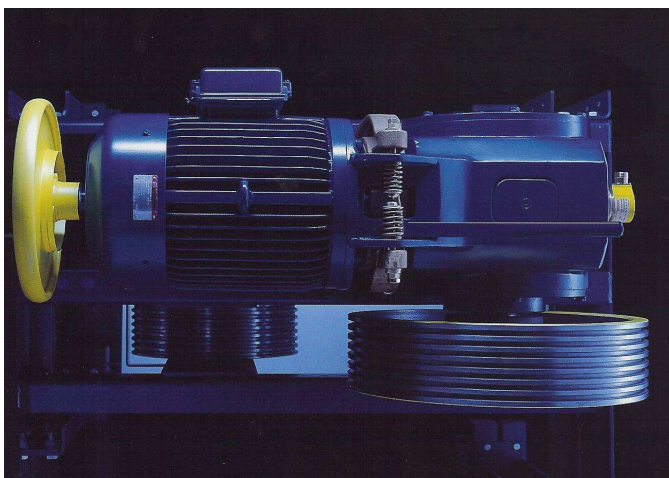


Figura 3 – Máquina assíncrona de uma velocidade
Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores

A grande maioria destas máquinas instaladas ainda hoje estão em utilização em Portugal, embora já há mais de 20 anos que não sejam instaladas em novos ascensores.

Máquina com redutor e motor assíncrono de duas velocidades:

Por forma a reduzir as sacudidas bruscas no arranque e principalmente na paragem da máquina, mantendo ainda assim uma elevada velocidade nominal, e sem grande necessidade de um sistema de controlo da velocidade complexo, foram introduzidos os motores assíncronos de dois enrolamentos com um número de par de pólos diferente

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

(motores com comutação de pólos). Um enrolamento para a grande velocidade (com menor número de pares de pólos) e um enrolamento para a pequena velocidade (com maior número de pares de pólos). Esta última representa normalmente $\frac{1}{4}$ da velocidade nominal. Desta forma conseguia-se garantir uma elevada velocidade nominal, por um lado, e uma reduzida velocidade de paragem, por outro, obtendo-se uma paragem mais suave e mais nivelada ao piso. Através de dois contactores eram accionados sequencialmente os dois enrolamentos. A sacudidela brusca que ocorria na comutação (arranque e paragem) era atenuada por um volante de inércia. A roda de inércia que acumula a energia que é dissipada mais tarde, contribui, contudo, para a baixa eficiência do sistema.

Para garantir que o elevado número de rotações e o baixo binário característicos deste tipo de motor assíncrono pudessem ter aplicação em ascensores, foram adaptados redutores de sem fim com roda de coroa.

Com estas máquinas conseguiam-se velocidades nominais até 1,2 m/s. A travagem era efectuada por duas maxilas cuja abertura e fecho se realizava por bobinas eléctricas. A actuação decorre com a máquina ainda em movimento por inércia, na segunda velocidade (baixa velocidade).

Este tipo de motor era o mais frequentemente utilizado até ao surgimento da máquina controlada por variador de frequência, estando ainda hoje em funcionamento em muitos edifícios em Portugal (principalmente em edifícios de habitação).

Tratava-se de uma máquina de fácil concepção, muito robusta e de baixo custo de produção, não sendo hoje já instalada em novos elevadores.

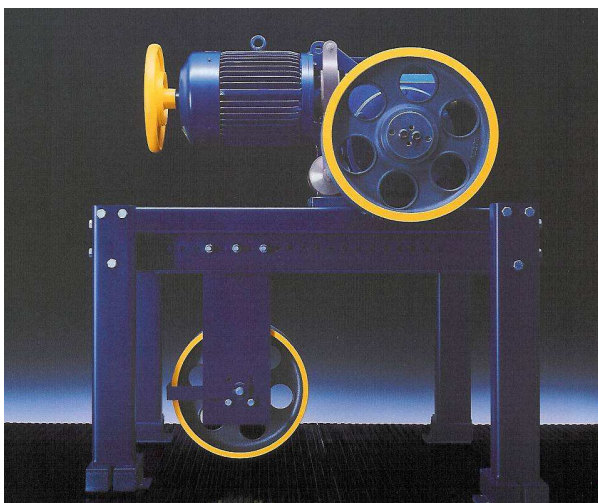


Figura 4 – Máquina assíncrona de duas velocidade
Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores

Máquina com motor assíncrono com redutor controlado por conversor de frequência

Com a evolução da tecnologia e com a resultante entrada em vigor de novas normas e regulamentos, nomeadamente do Decreto-Lei 163/2006 de 8 de Agosto (que define as condições de acessibilidade a edifícios por parte de pessoas com mobilidade condicionada), os ascensores devem ter uma precisão de paragem relativamente ao nível do piso dos patamares não superior a $\pm 0,02$ m (ou mais recentemente com a imposição de $\pm 0,01$ m na emenda A3 da NP EN 81-1:2000+A3:2009). Ora tal obrigatoriedade não pode ser cumprida recorrendo a máquinas com redutor e motor de duas velocidades. Por forma a dar cumprimento às novas exigências foi necessário utilizar outros tipos de máquinas: uma das soluções encontradas, foi a máquina com motor assíncrono, mas controlado por um conversor electrónico de frequência.

A velocidade de um motor assíncrono é proporcional à frequência da rede de alimentação. O conversor electrónico de frequência permite controlar a máquina alimentando o motor com uma gama alargada de frequências e desse modo obter diferentes velocidades de funcionamento para o motor. Durante a fase de paragem do ascensor é o próprio conversor que leva a máquina até uma velocidade zero, sendo a frequência de alimentação gradualmente reduzida.

Com a combinação máquina com redutor e motor assíncrono controlada por um conversor electrónico de frequência, conseguiu-se aumentar o rendimento do sistema, adaptar o motor à carga, em binário e em velocidade, e garantir arranques suaves e uma frenagem controlada, com uma paragem nivelada ao piso.

2.2.2 Máquina sem redutor com motor síncrono

No motor síncrono, o rotor roda à velocidade de sincronismo, isto é, à velocidade do campo girante produzido pelos enrolamentos do estator. Esta máquina não tem por isso escorregamento. A relação entre a velocidade de rotação do motor síncrono (n), a frequência da corrente (f) e o número de par de pólos da máquina (p) é dada pela seguinte expressão:

$$n = \frac{f}{p}$$

O motor síncrono tem a particularidade, e a grande vantagem, de ter uma velocidade absolutamente constante e igual à velocidade de sincronismo, imposta pela rede. As variações de carga (desde a carga nula até à carga nominal) não alteram a velocidade do motor. Para alterar o valor da velocidade, e tomando como base a relação anterior, ter-se-ia

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

de alterar o valor da frequência da corrente de alimentação ou o número de pares de pólos do motor. Dado que o motor síncrono de ímanes permanentes possui um número de pares de pólos fixo, a velocidade de funcionamento apenas poderá ser variada através da variação da frequência, sendo para tal necessário recorrer-se a um conversor electrónico de frequência.

O estado da arte é representado pelas máquinas sem redutor com motores síncronos de ímanes permanentes controlados por conversores electrónicos de frequência. Este tipo de máquinas são actualmente a tecnologia dominante na indústria europeia de ascensores.

Estas máquinas conseguem um elevado binário com baixas rotações, evitando-se dessa forma a necessidade de um redutor. Obtém-se um funcionamento com baixo ruído, com baixo custo de operação e manutenção e um elevado rendimento.

Por outro lado, a evolução na tecnologia de motores com ímanes permanentes permitiu uma redução significativa na dimensão e na forma das máquinas de tracção, o que possibilitou a sua instalação dentro da própria caixa do ascensor (eliminando-se a necessidade de construção da casa de máquinas), maximizando o espaço útil para a instalação da cabina nos modernos elevadores sem casa das máquinas.

A dimensão do motor também pode ser reduzida devido ao sistema de amarração dos cabos de tracção utilizado. Em função da desmultiplicação utilizada 2:1 ou 4:1, a velocidade da cabina é reduzida para $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ da velocidade do cabo e a carga no cabo é igualmente reduzida para $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$. Logo o diâmetro e o número de cabos pode ser reduzido, podendo-se utilizar um motor de menor dimensão.

Durante a fase de paragem do ascensor, é o próprio conversor electrónico de frequência que leva a máquina até uma velocidade zero. Só então é actuado o sistema de travão. Estas máquinas são dotadas de um sistema especial de travões de disco.

Com este tipo de sistema de tracção conseguem-se obter altas velocidades na ordem dos 6 m/s, com baixos consumos energéticos.

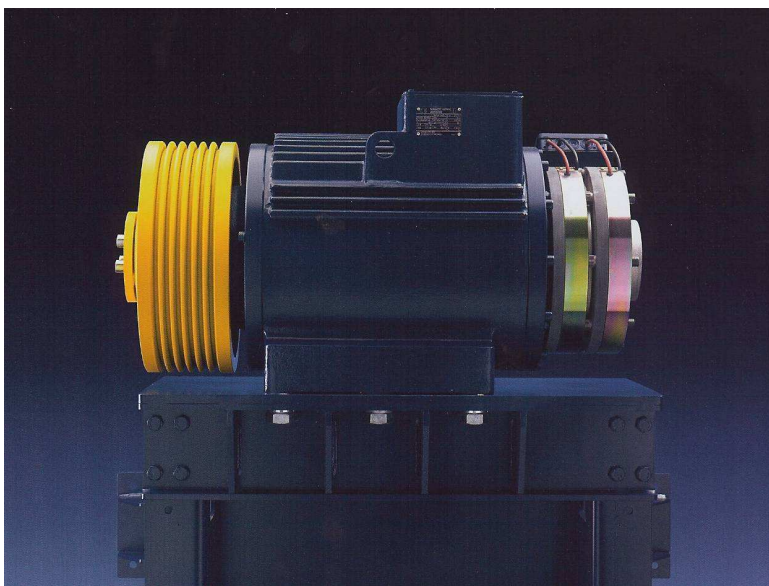


Figura 5 – Máquina com motor síncrono com ímanes permanentes sem redutor
Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores

Uma vez que estes motores não têm enrolamentos no rotor – o campo magnético é fornecido por ímanes permanentes – eles apresentam menos perdas por efeito de *Joule* do que os motores de indução equivalentes. As perdas magnéticas no rotor são também inferiores. Dessa forma este tipo de máquina apresenta uma elevada eficiência energética. Inicialmente, eram utilizados ímanes de ferrite para criar o campo magnético, mas à medida que a tecnologia evoluiu e com a redução de custos passaram-se a utilizar terras raras (como por exemplo o Samarium Cobalto – SmCo). Estes materiais têm uma elevada densidade de energia magnética melhorando as relações potência vs. peso e binário vs. peso.

Apesar de se perder um grau de liberdade (a possibilidade de controlar a corrente de campo), ganha-se em compactidade e simplicidade e tornam-se desnecessários os sistemas de excitação que encarecem bastante este tipo de máquinas.

Uma vez que não necessitam de uma corrente de excitação¹⁸, este tipo de motores apresentam uma maior eficiência e uma mais rápida resposta de velocidades quando comparados com os tradicionais motores de indução.

¹⁸ Não necessitam de uma corrente de excitação porque o íman permanente substitui o circuito de campo e o fluxo produzido é constante.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O potencial de poupança de energia em ascensores, utilizando diferentes tecnologias pode então ser representado por (estudo Flender-ATB-Loher in Almeida *et. al.*, 2010):

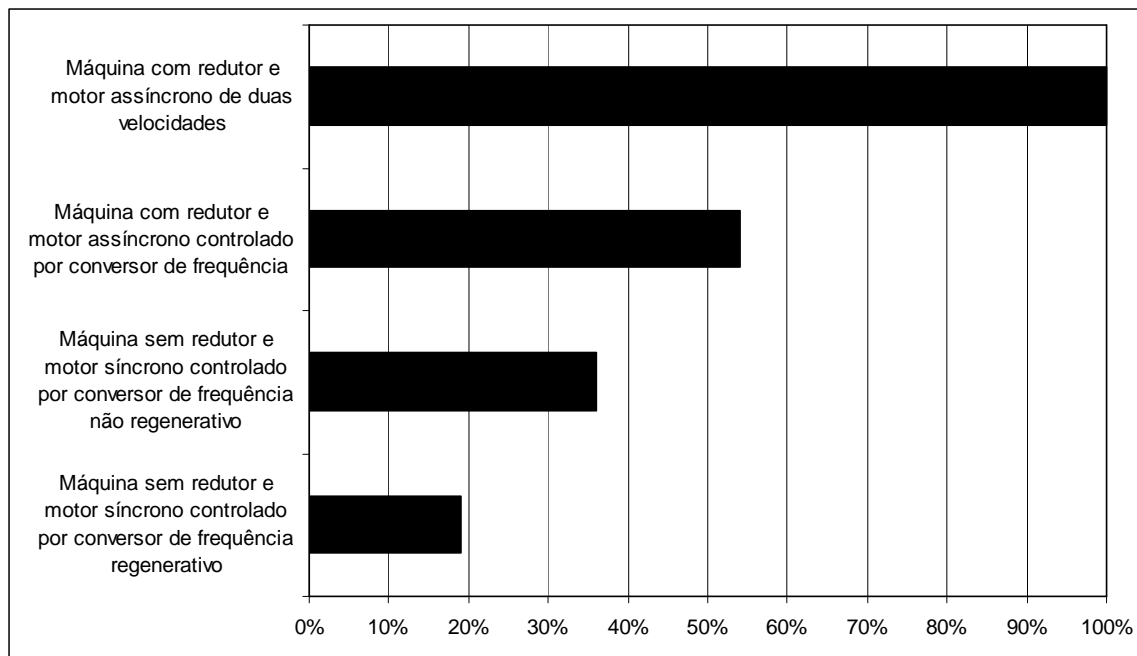


Figura 6 – Balanço energético de ascensores, consumo energético médio, percentagem

Fonte: Almeida *et. al.* (2010), citando um estudo da Flender-ATB-Loher, Systemtechnik

Pela análise do gráfico pode então verificar-se que a utilização de uma máquina síncrona sem redutor controlada por um conversor de frequência regenerativo consumirá apenas 19% da energia que uma máquina convencional assíncrona de duas velocidades consome.

2.3 Conversores electrónicos de frequência

O fornecimento de energia eléctrica necessária para controlar o funcionamento de uma máquina pode ser realizado através de um conversor electrónico de frequência. Estes sistemas constituídos por circuitos com dispositivos electrónicos à base de semicondutores permitem obter formas apropriadas de tensão e corrente a partir de fontes de alimentação disponíveis.

Um conversor electrónico de frequência é composto pelos seguintes elementos (Franchi, 2008):

1. Unidade central de processamento:

Trata-se do elemento responsável pelo armazenamento de todos os parâmetros e dados do sistema e pela execução da geração dos impulsos de disparo dos

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

dispositivos semicondutores de potência. O funcionamento deste elemento é assegurado por um microprocessador ou por um microcontrolador, dependendo do fabricante.

2. Interface homem-máquina

Possibilita a parametrização do conversor em função das necessidades do sistema, mas também a visualização num *display* de informações relevantes sobre o funcionamento do sistema, como por exemplo a tensão, a corrente e a frequência da corrente eléctrica que está a alimentar o motor em cada momento.

3. Outros interfaces

Entradas para sinais analógicos ou digitais, como indicação de arranque ou paragem do sistema, etc.

Saídas para sinais analógicos ou digitais para enviar informação sobre o estado do sistema, como por exemplo, indicação de falha, ou indicação sobre motor em rotação, etc.

4. Bloco de potência, constituído por:

- + Rectificador, um conversor que tem a função de transformar a corrente alternada em corrente contínua. A corrente alternada proveniente da rede de alimentação com uma frequência fixa de 50Hz é transformada pelo rectificador em corrente contínua através de um conjunto de díodos (componentes semi-condutores que não recebem comandos exteriores, mas que operam espontaneamente com a função de válvula, isto é, fechando quando polarizados directamente, deixando-se atravessar por corrente nesse sentido e bloqueando se for solicitada a passagem de corrente em sentido contrário);
- + Barramento DC ou circuito intermédio com filtro: tem a função de regular a tensão rectificada, armazenando energia em condensadores;
- + Inversor, um conversor que converte a corrente contínua em corrente alternada. A corrente contínua do barramento DC alimenta a etapa inversora, que é composta por 6 transistores de potência denominados IGBT (*isolated gate bipolar transistor*)¹⁹. Estes serão responsáveis pela inversão da tensão contínua num sinal alternado, com tensão e frequências variáveis.

¹⁹ Um IGBT (em português, um transistor bipolar de porta isolada) é um dispositivo de comutação utilizado nos conversores de potência, que permite rápidas comutações com baixas perdas de condução.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O sistema conversor mais utilizado em ascensores é o sistema VVVF (*Variable Voltage Variable Frequency*), uma vez que será o método de comando que apresenta um melhor rendimento e um mais baixo custo, quando comparado com outros sistemas conversores²⁰.

O sistema de conversor VVVF baseia-se no princípio fundamental de que a velocidade do motor de indução está directamente ligada à frequência da energia eléctrica de alimentação aplicada à bobinagem do estator. Variando a frequência e mantendo a relação tensão / frequência constante, a curva velocidade-binário de um motor de indução é deslocada mantendo um binário-motor constante (Almeida et. al. 2010).

Num conversor VVVF a corrente eléctrica alternada trifásica, a 50 Hz é convertida em corrente contínua, depois filtrada e por fim o inversor converte a tensão DC na tensão e frequência de *output* pretendida para alimentar o motor.

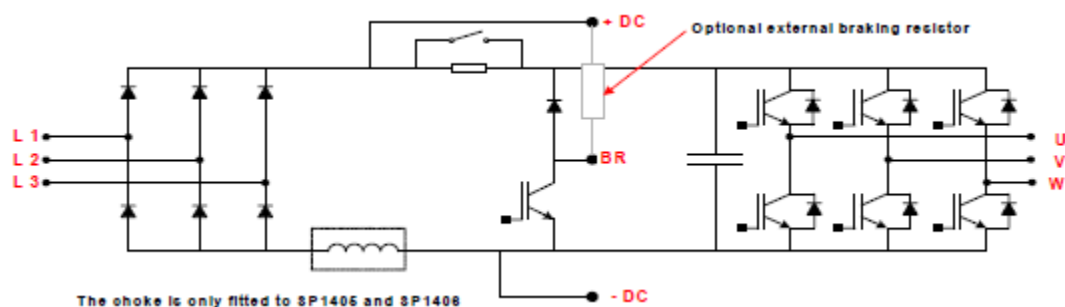


Figura 7 – Esquema de um conversor electrónico de frequência (VVVF)

Fonte: Control Techniques, 2007



Figura 8 – Diagrama de blocos de um conversor electrónico de frequência (VVVF)

Fonte: Autor, 2013

²⁰ Um outro sistema conversor que poderia ser utilizado no controlo de velocidade do motor de indução seria o conversor inversor de corrente, que permite a possibilidade de comandar a máquina assíncrona de rotor em gaiola de esquilo através da imposição de correntes no estator com uma dada amplitude e frequência. Contudo, os conversores reais controlados para este fim apresentam dinâmicas que podem criar deformações nas correntes injectadas na máquina e que influenciam fortemente o desempenho do conjunto. Além da distorção bastante significativa que se regista na corrente à saída do ondulator, ocorre ainda um atraso devido à dinâmica do controlo da corrente com o rectificador, prejudicando o desempenho do sistema de controlo a baixas velocidades (Paiva, 2005). Este sistema conversor apresenta um rendimento inferior e um custo superior ao conversor VVVF.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O conversor de frequência mais utilizado na indústria de ascensores é ainda dotado de um inversor com técnica de comando PWM - *Pulse Width Modulation* (Almeida et. al. 2010).

De acordo com Almeida (2010), os interruptores do inversor são utilizados para dividir a curva de saída quase sinusoidal numa série de curtos impulsos de tensão e modular a largura desses impulsos. O inversor PWM mantém uma tensão quase constante no barramento DC, combinando o controlo da tensão com o controlo da frequência dentro do próprio inversor. O objectivo do inversor PWM é o de fornecer uma corrente de alimentação ao motor tão próxima quanto possível de uma curva sinusoidal.

Os harmónicos de ordem inferior podem ser fortemente atenuados e dessa forma o motor tende a rodar de uma forma mais suave a baixa velocidade, mantendo o conforto de andamento em níveis elevados. Os harmónicos de ordem superior na corrente do motor são limitados pela indutância do motor. A pulsação do binário será virtualmente eliminada e as perdas adicionais no motor causadas pelo inversor são reduzidas substancialmente. Outras vantagens incluem o factor de potência quase próximo de 1 ao longo de toda a gama de velocidades, baixa distorção da corrente do motor e quando com a tipologia própria, a capacidade de recuperação de energia (como se irá abordar no capítulo 4).

Nos conversores de frequência mais antigos com controlo escalar, mantendo a relação V/f constante, o fluxo só é mantido aproximadamente constante. Sob condições dinâmicas só se conseguirá uma estratégia de controlo limitada da *performance*²¹.

Os modernos conversores de frequência utilizam métodos sofisticados de controlo, designados por controlo vectorial. O objectivo do controlo vectorial é o de possibilitar um controlo independente do binário e do fluxo numa máquina de corrente alternada.

Como os transistores trabalham como uma chave “liga / desliga”, a forma de onda da tensão de saída do inversor será sempre quadrada. Para se obter uma curva de tensão o mais próxima possível de uma curva sinusoidal, os IGBTs terão de ser actuados através de uma técnica de modulação de largura de impulso (PWM). Existem duas classes importantes destas técnicas de modulação de largura de impulso²²:

- a. PWM com padrão pré-calculado: a sequência de configurações do conversor ao longo do ciclo fica guardada numa memória que é lida ciclicamente, desencadeando a actuação dos dispositivos convenientes. A frequência f a

²¹ O método de controlo “controle escalar” impõe ao motor uma determinada tensão/frequência, por forma a manter a relação V/f constante, ou seja o motor deverá trabalhar com um fluxo aproximadamente constante. Esta técnica de controle apenas considera as amplitudes das grandezas eléctricas instantaneas (fluxos, correntes e tensões), referindo-as ao estator. É um método não utilizado actualmente na indústria de ascensores em novos ascensores.

²² Não faz parte do âmbito desta tese descrevê-las em detalhe. Para uma análise detalhada, consultar Palma 2008.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

obter será estabelecida pela rapidez de varrimento da memória. O padrão, isto é, a forma das grandezas convertidas é previamente calculada de modo a proporcionar uma amplitude desejada da componente fundamental (Palma, 2008)

- b. PWM com modulação por sub-harmónica: em cada instante a configuração do conversor é decidida pela intersecção de sinais (modulantes) com amplitude e frequência desejada com outros de frequência mais elevada e, geralmente, com forma triangular (Palma, 2008).

A técnica mais utilizada actualmente é a PWM com modulação por sub-harmónica. Mediante a utilização de um microprocessador as funções de controlo do PWM são realizadas pela combinação de uma onda triangular e uma onda sinusoidal que produzirá uma onda de tensão de saída. O sinal triangular será a frequência de actuação do inversor. O gerador da onda sinusoidal produzirá um sinal que determinará a largura dos impulsos e logo a tensão de saída do inversor.

O IGBT é activado por um curto período de tempo, permitindo que apenas uma pequena parcela da corrente eléctrica chegue ao motor. O IGBT é então ligado por períodos de tempo maiores, permitindo a passagem de correntes maiores para o motor até que seja atingida a corrente nominal do motor. Em seguida o IGBT é ligado progressivamente por períodos de tempo menores, diminuindo a corrente que alimenta o motor.

O conversor de frequência deve garantir que a variação da tensão aplicada seja proporcional à frequência, o que é feito pelo ajuste automático dos disparos dos transistores (IGBTs) por sistemas microprocessados.

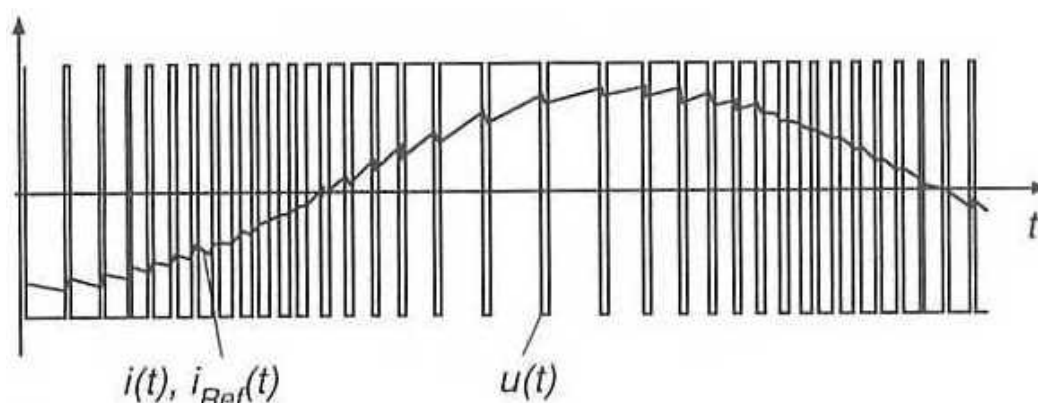


Figura 9 – Pulsação sinusoidal obtida com a técnica de modulação PWM

Fonte: Almeida et. al., 2010

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O método de controlo vectorial é recomendado em aplicações em que existe a necessidade de alta performance dinâmica, respostas rápidas e alta precisão de regulação de velocidade, como é o caso dos ascensores. O motor deverá fornecer um controle preciso de binário para uma faixa extensa de condições de operação.

A parte principal de um sistema de controle vectorial é o modelo activo do motor que continuamente modela as condições internas do motor e realiza as seguintes operações:

- + Calcula continuamente em tempo real a corrente de produção de binário, armazenando as constantes do motor na memória para serem utilizadas para o cálculo, medindo a corrente do estator e a tensão em cada fase e medindo a velocidade (através de um encoder) ou calculando a velocidade (sem encoder).
- + Calcula continuamente em tempo real a corrente de produção de fluxo.
- + Implementa uma malha de controlo de velocidade pela comparação da velocidade medida com um valor de velocidade desejado, fornecendo uma saída para actuar sobre o controlo de binário do motor.
- + Implementa uma malha de controlo pela comparação do binário actual, calculado a partir da medição da corrente e da velocidade, enviando um sinal de saída para o circuito de controlo da lógica do PWM.
- + Actualiza constantemente as informações e mantém um controlo robusto sobre o processo.

Existem duas formas de controle vectorial:

a. Controle vectorial de malha aberta

Apresenta limitações de binário, principalmente em baixas rotações do motor. Para velocidades elevadas consegue uma performance idêntica à do controle vectorial de malha fechada.

Opera como um dispositivo de controle da frequência com a compensação do escorregamento, mantendo a velocidade real do motor próxima da desejada. O bloco que estima o binário, determina a percentagem de corrente que está em fase com a tensão, gerando um binário aproximado. Este método é utilizado para estimar o escorregamento, gerando um melhor controle da velocidade sobre a carga.

Este tipo de controle verifica quer a amplitude da tensão e da corrente, quer o ângulo entre ambas. O ângulo de tensão do motor controla a quantidade de corrente que irá para o fluxo do motor. Através do controle desse ângulo, a operação em baixas velocidades e o controlo de binário é superior à técnica de controle V/f .

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

b. Controle vectorial de malha fechada

A realimentação é executada através de sensores de corrente e sensores de posição (*encoders*).

O controle é realizado pela separação da corrente do estator em duas componentes, uma que produz o binário e outra que produz o fluxo no entreferro.

Como vantagens pode-se referir uma elevada precisão de regulação de velocidade e uma operação suave em baixa velocidade e sem oscilações de binário, mesmo existindo uma variação de carga.

Quando combinada com o *feedback* de um encoder para medir o escorregamento, passa a estar disponível o binário total do motor, mesmo para baixas velocidades, incluindo zero rotações por minuto.

Para este tipo de controlo é necessário utilizar as equações do modelo dinâmico do motor de indução, baseadas nas correntes e tensões instantâneas, por forma a controlar a interacção entre o rotor e o estator, resultando no controlo do fluxo e do binário.

Pode demonstrar-se que no processo de aceleração do motor, se este arrancar sem qualquer controlo da velocidade, as perdas no rotor serão superiores à opção de se utilizar um processo de aceleração eficiente através de controlo vectorial (este permite reduzir significativamente o consumo energético). Os conversores aumentam a eficiência através da adequação da velocidade à carga, o conforto de andamento da cabina, asseguram uma paragem nivelada aos pisos e permitem uma redução do dimensionamento da fonte de alimentação principal devido a uma redução do pico de carga.

No estudo dos ascensores da carteira da Schmitt-Elevadores, Lda. que se apresentará no capítulo 3, o conversor electrónico de frequência utilizado é o *Unidrive SP* da *Control Techniques* que pode ser operado em modo *open loop*, *closed loop* ou *servo*. Foi desenvolvido um *software* específico – o *elevator solution software* – que incorpora um calculador do perfil de manobra com um nível especial de operação específico para ascensores. Esta característica permite que o conversor possa ser aplicado em ascensores com máquinas de tracção com motores assíncronos com redutor e com máquinas sem redutor com motores de ímanes permanentes.

O conversor é controlado através de uma porta digital pelo comando do ascensor. O *software* recebe os sinais de controlo do comando do ascensor e deriva os sinais para a

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

velocidade e o sentido, bem como os sinais para o controlo do travão e controlo dos contactores do motor. O comando do ascensor avalia as chamadas dos patamares e as ordens de dentro da cabina e gera os sinais adequados que são enviados ao conversor. O comando do ascensor determina o arranque, a direcção e a velocidade de operação do ascensor, bem como as funções de controlo relacionadas com a segurança. O *software* do conversor recebe os comandos de manobra e modifica continuamente o perfil de velocidade ajustando-o à distância a percorrer e ao conforto de andamento.

A Schmitt-Elevadores, Lda. utiliza apenas conversores com controle vectorial de malha fechada, pelo que a máquina do ascensor está dotada de um encoder que indica continuamente ao conversor a velocidade real do motor. Existe ainda um encoder adicional que indica ao comando (e ao conversor de frequência) qual a posição exacta da cabina na caixa do ascensor.

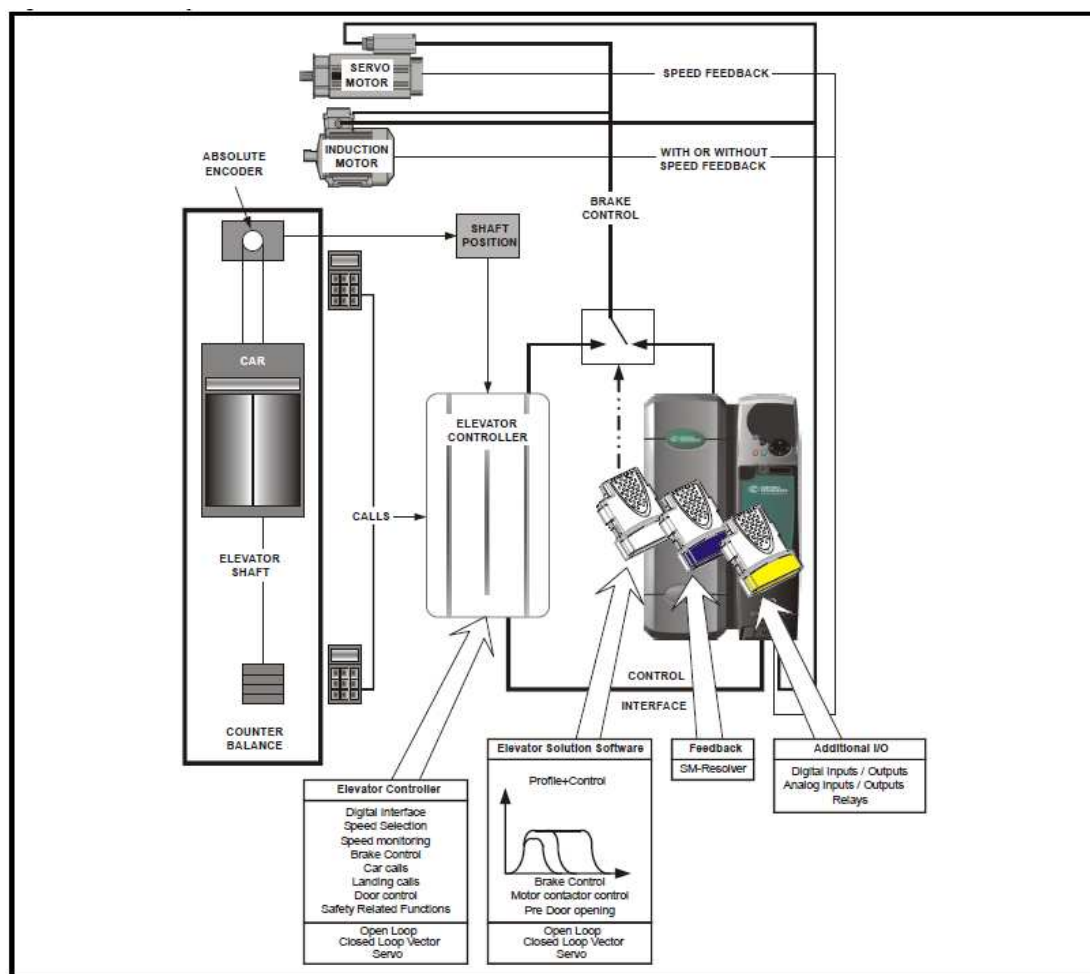


Figura 10 – Interligação do conversor electrónico de frequência e o ascensor
Fonte: Control Techniques, 2007

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Na sua aplicação em ascensores a frequência variará tipicamente entre 0 e 50 Hz. Durante a fase de paragem do ascensor, é o próprio variador de frequência que leva a máquina até uma velocidade zero, sendo a frequência de alimentação gradualmente reduzida. Neste processo, a velocidade instantânea do sistema é superior à velocidade síncrona, devido à inércia do sistema. A acção geradora do motor irá causar uma inversão no sentido do fluxo da potência, e a energia cinética do sistema é normalmente dissipada pela resistência²³. Só quando a máquina estiver completamente parada é que é actuado o sistema de travão.

Na figura 11 apresenta-se o perfil de aceleração, velocidade constante e desaceleração, que será aplicado à máquina de tracção durante cada manobra. É importante conhecer este perfil para perceber a dinâmica de todo o sistema, bem como a energia que estará em jogo em cada fase da curva.

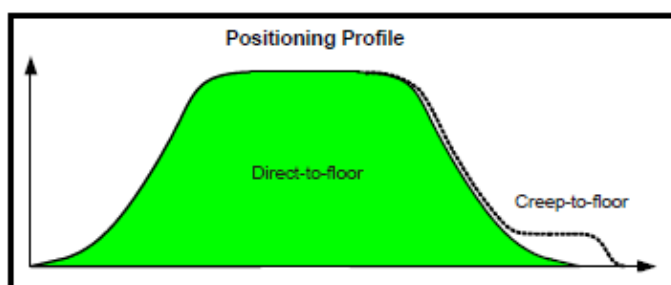


Figura 11 - Forma da curva de aceleração e desaceleração
Fonte: Control Techniques, 2007

Na figura 12 apresenta-se um moderno conversor electrónico de frequência, normalmente instalado no próprio quadro de comando do ascensor.



Figura 12 – Conversor electrónico de frequência
Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores

²³ No capítulo 4 serão estudadas as hipóteses de afectação diferente desta energia recuperada.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

As vantagens dos modernos conversores de frequência face aos sistemas mais clássicos de comando e de regulação (como por exemplo a comutação de pólos) são:

- a. automatização completa do comando e controlo da máquina, com a maior precisão, sem necessidade frequente de intervenção humana, evitando mesmo todo o conjunto de erros involuntários cometidos pelo homem (Matias, 2005);
- b. através de regulação electrónica consegue-se regular a velocidade para o valor ideal, correspondente ao máximo rendimento e geralmente também ao máximo factor de potência, obtendo-se uma economia de energia;
- c. os conversores electrónicos permitem um controlo eficaz durante a fase de arranque do motor, com redução das frequências parasitas que surgem e também na adaptação mais correcta do binário motor ao binário resistente, de modo a reduzir o mais possível o pico de corrente no arranque. As elevadas correntes de arranque, apesar de transitórias, são prejudiciais para o equipamento e provocam interferências na rede (surgimento de frequências diferentes, que podem modificar a curva de tensão alternada da rede, mas também devido às quedas de tensão que provocam).
- d. Adaptação do motor à carga, em binário e velocidade
- e. Arranques suaves e frenagem controlada
- f. Protecção do motor contra curtos-circuitos, sobrecargas, sobretensões, falta de fase
- g. Menor desgaste de componentes e equipamentos mecânicos
- h. Quando o conversor de frequência o permite, é possível proceder à recuperação de energia eléctrica que pode depois ser armazenada ou reinjectada na rede (ver hipóteses de trabalho no capítulo 4).

Se a energia cinética que resulta da acção geradora do motor, em vez de ser dissipada pela resistência, fosse convertida em energia eléctrica, esta poderia ser fornecida novamente à fonte de alimentação, aumentando o rendimento global do sistema. Este processo é designado como recuperação. Para tal o conversor electrónico de frequência tem de permitir a reinjecção de energia na rede. Os mais recentes conversores electrónicos de potência são conversores regenerativos, isto é, o rectificador em vez de ser composto por díodos (conforme indicado na figura 7), passa a ser constituído por IGBTs, conforme se pode ver na figura 13. Dessa forma é possível garantir o fluxo de energia eléctrica nos dois sentidos, isto é, da rede de alimentação para o motor (quando a máquina está em modo motor) e do motor para a rede de alimentação (quando a máquina está em modo gerador). Para uma explicação detalhada do fenómeno físico envolvido, consultar o ponto 2.5.1.

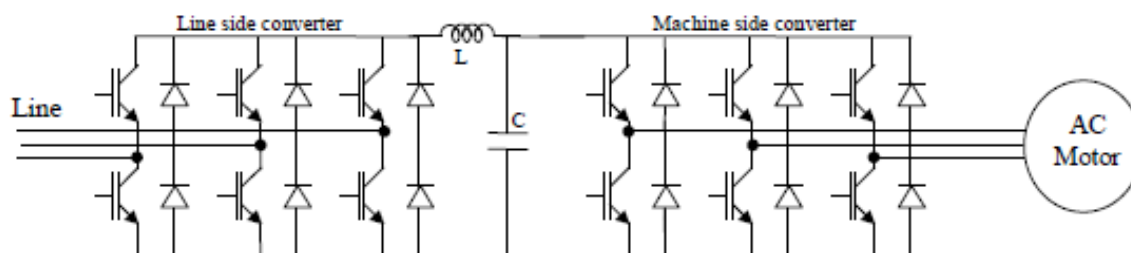


Figura 13 – Moderno conversor electrónico de frequência regenerativo bidireccional (VVVF)

Fonte: Almeida et. al., 2010

2.4 Armazenamento de Energia

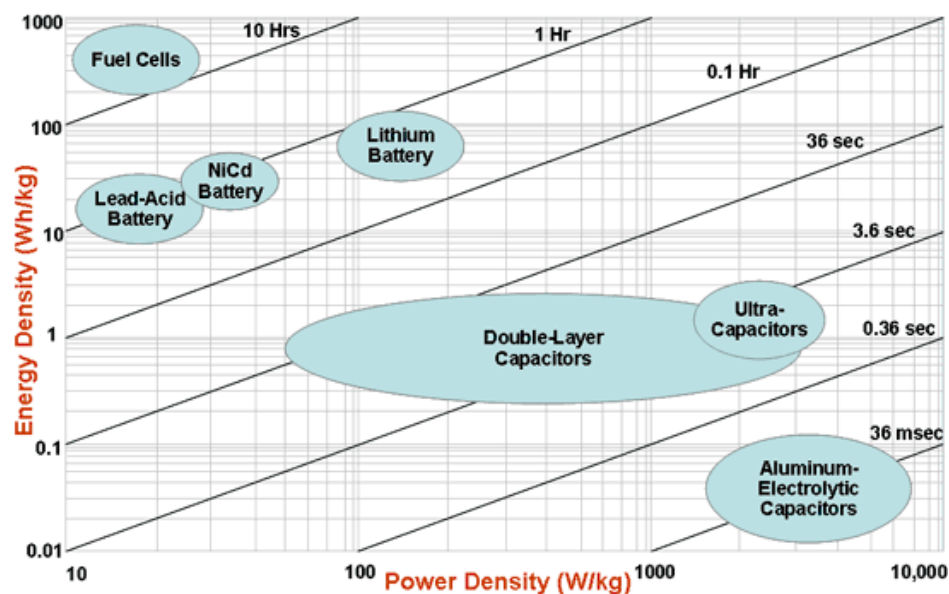
Existe um conjunto alargado de tecnologias de armazenamento de energia eléctrica. Na presente tese apenas se abordarão as soluções que já apresentam uma maturidade e um nível de custo aceitável, como as baterias, os condensadores e os supercondensadores. Outras soluções, como por exemplo o volante de inércia (*Flywheel*) em que a energia é armazenada na forma de energia cinética num denso volante de inércia em alta rotação²⁴, a bobina supercondutora (*SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage*) na qual se recorre ao campo magnético desta para armazenar energia²⁵, ou a pilha de combustível, não permitem ainda uma utilização prática e económica em ascensores existentes pelo que não serão consideradas na presente análise.

Apresenta-se na figura 14 o diagrama de *Ragone*, que é utilizado para comparar a performance das várias soluções de armazenamento de energia. Neste diagrama são evidenciados os valores de densidade de energia (em Wh/kg) vs. a densidade de potência (em W/kg). Ambos os eixos são logarítmicos, o que permite otimizar a comparação dos diferentes equipamentos de armazenagem de energia. Conceptualmente, o eixo vertical descreve quanta energia é necessária e o eixo horizontal quão depressa essa energia pode ser fornecida.

²⁴ Este sistema de armazenamento de energia é composto por um rotor que gira num espaço em vácuo – para minimizar as perdas aerodinâmicas - e por um motor/gerador que permite impulsionar a *flywheel* dando-lhe velocidade (motor) ou converter a energia cinética do rotor em energia eléctrica (gerador). A ideia é imprimir uma velocidade superior a 150.000 rotações por minuto e posteriormente utilizar a energia eléctrica armazenada neste sistema. Este sistema de armazenagem tem várias desvantagens, nomeadamente a pouca resistência a choques mecânicos exteriores que provocam vibrações que resultam em perda de energia, o risco de desintegração e a tensão e frequência de saída que apresentam grandes variações de amplitude.

²⁵ Trata-se de um sistema que armazena energia através de um campo magnético, criando circulação de corrente contínua numa bobina supercondutora que foi criogenicamente arrefecida até uma temperatura abaixo da sua temperatura crítica supercondutora. Um sistema SMES é composto por três componentes: a bobina supercondutora, o sistema de conversão de energia e uma câmara de refrigeração criogenicamente arrefecida. Quando a bobina supercondutora é carregada, a energia é armazenada no campo magnético podendo ser armazenada indefinidamente. Esta energia pode ser aproveitada para alimentar a rede ou uma carga através de um sistema de conversão de energia composto por um inversor / rectificador. Este mesmo conversor pode ser usado para carregar a bobina.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia



Source US Defence Logistics Agency

Figura 14 – Diagrama de Ragone

Fonte: consultado em <http://www.mpoweruk.com/performance.htm>, 2013

2.4.1 Baterias

Trata-se de um dispositivo que permite acumular energia sob a forma de energia química, conservá-la e restituí-la quando necessário como energia eléctrica através de reacções electroquímicas de oxidação-redução.

De acordo com a CEEETA (2001) existem duas categorias principais de baterias:

- c. as baterias primárias, que produzem electricidade sem a necessidade de serem carregadas por outra fonte de alimentação externa. A energia é produzida a partir de uma reacção electroquímica, geralmente irreversível, que as inutiliza após a sua utilização.
- d. as baterias secundárias, que têm de ser carregadas por uma fonte de alimentação externa antes de produzirem electricidade. Estas podem ser carregadas e descarregadas diversas vezes, podendo armazenar mais energia do que uma bateria primária.

As baterias que eventualmente podem ser utilizadas para a recuperação de energia em ascensores são baterias do tipo secundário, ou seja, baterias recarregáveis. Estas são constituídas por um conjunto de várias células elementares, que por sua vez são compostas por dois eléctrodos metálicos (um ânodo e um cátodo) imersos num electrólito – um ácido

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

ou uma base, contido num recipiente. Quando aos terminais dos eléctrodos for acoplado um circuito externo, uma carga ou uma fonte de tensão, ocorrerão reacções de oxidação-redução entre os eléctrodos e o electrólito que promovem trocas iónicas entre estes elementos fazendo com que circule no circuito externo uma corrente eléctrica. Invertendo-se o sentido dessa corrente inverte-se o sentido das reacções químicas, pelo que é possível carregar e descarregar as células. Uma bateria consiste na associação, normalmente em série, de várias células elementares, o que permite elevar a tensão fornecida aos terminais e a capacidade de armazenamento de energia (Garrido, 2010).

Para o dimensionamento de um sistema que utilize baterias recarregáveis é necessário conhecer as suas características por forma a seleccionar o tipo de bateria mais adequado às condições de funcionamento do sistema. Dever-se-ão ter em conta as seguintes características fornecidas pelos fabricantes nas folhas de características das baterias:

Capacidade, em Ah - exprime a intensidade máxima de corrente que teoricamente uma bateria é capaz fornecer durante uma hora de funcionamento a 25 °C (e.g. uma bateria de 80 Ah pode fornecer 80 A durante 1 hora, ou 4 A durante 20 horas).

Tempo de descarga, em segundos – tempo que corresponde à duração típica do processo de descarga da bateria

Corrente de descarga, em A – é a corrente máxima que a bateria pode fornecer continuamente, sem que esta seja danificada ou inutilizada. Esta corrente é definida pelo fabricante da bateria.

Densidade de energia, em Wh/kg – quantidade de energia eléctrica armazenada por kg de massa.

Densidade de energia volumétrica, em Wh/m³ – quantidade de energia eléctrica armazenada por metro cúbico de volume da bateria.

Potência específica, em W/kg – quantidade de potência por kg de bateria. Embora a bateria tenha uma potência máxima, não é aconselhável que esta funcione perto deste ponto durante mais do que alguns segundos.

Ciclo de vida - número de vezes que a bateria pode ser descarregada e carregada durante a sua vida útil. Quando a bateria não consegue apresentar uma carga superior a 80% da sua carga nominal, considera-se o seu ciclo de vida terminado.

Tensão nominal, em V – tensão aos terminais da bateria quando esta se encontra em carga e carregada.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tensão máxima, em V – ou tensão em circuito aberto é a tensão lida aos terminais da bateria quando esta não se encontra em carga ou a tensão até à qual a bateria pode receber em carga.

Tensão de descarga mínima, em V – ou tensão de *cut-off*. Tensão a partir da qual a bateria está descarregada.

Profundidade de descarga, em % - refere-se à quantidade de carga retirada da bateria num ciclo típico de funcionamento, expressa em percentagem da capacidade nominal desta. Considera-se uma boa profundidade de descarga um valor em torno dos 80%.

Resistência interna, em Ω – por vezes é necessário que a bateria forneça elevados picos de corrente por curtos períodos de tempo. Logo, quanto mais baixa for a resistência interna da bateria, em melhores condições a bateria pode fornecer estes picos de corrente.

Taxa de auto-descarga – quantidade de carga perdida pela bateria, expressa em percentagem, mesmo quando esta não se encontra em funcionamento.

Apresentam-se em seguida os diferentes tipos de baterias recarregáveis existentes no mercado:

Baterias chumbo-ácido:

São o tipo de baterias mais comum devido ao seu baixo custo e ao bom nível de desempenho. Neste tipo de baterias os eléctrodos são constituídos por placas de chumbo imersos num electrólito ácido, tipicamente o ácido sulfúrico. De um modo geral as baterias chumbo-ácido devem ser carregadas com correntes baixas, o que conduz a um tempo de carga elevado. Durante o processo de carga deve ser evitada a ocorrência de sobrecargas, uma vez que este tipo de baterias é sensível a este fenómeno. Este tipo de baterias nunca deve ser totalmente descarregado sendo que uma descarga total pode impossibilitar a recarga da bateria, ou pelo menos, diminuir a capacidade de carga. Estas baterias são ainda sensíveis a variações de temperatura: as altas temperaturas aumentam a capacidade e diminuem o tempo de vida útil e as baixas temperaturas diminuem a sua capacidade.

Existem dois grandes tipos de baterias chumbo-ácido:

- a. baterias chumbo-ácido ventiladas ou abertas (VLA): o electrólito encontra-se no estado líquido, obrigando ao funcionamento numa posição fixa para que não se dê o

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

derrame do electrólito, e à reposição periódica do nível de água uma vez que durante o funcionamento da bateria, principalmente em condições de sobrecarga, se dá a electrólise da água, que faz com que o oxigénio e o hidrogénio sejam libertados no estado gasoso.

- b. Baterias chumbo-ácido estanques ou reguladas por válvulas (VLRA): são baterias seladas possuindo, no entanto, válvulas que permitem a saída de gases quando a pressão no interior da bateria atinge níveis perigosos. As baterias VLRA apresentam face às baterias VLA a vantagem de permitirem a recombinação dos gases produzidos durante o seu funcionamento, reduzindo as perdas de água, o que faz com que não necessitem de manutenção. Dentro deste tipo de baterias distinguem-se ainda duas tecnologias diferentes:

- baterias com separador de microfibras de vidro, vulgarmente conhecidas por baterias AGM. Este separador absorve o electrólito, o que evita que este se desloque livremente no interior da bateria.

- bateria de gel, em que o ácido se encontra misturado com sílica, conferindo ao electrólito a consistência de um gel, o que mantém o electrólito imóvel no interior da bateria.

Baterias níquel-cádmio (Ni-Cd):

São constituídas por um ânodo de hidróxido de níquel, um cátodo de cádmio e um electrólito alcalino, tipicamente hidróxido de potássio. As reacções de oxidação-redução dão-se apenas entre os eléctrodos, o que anula a ocorrência de sulfatação. As baterias constituídas por acumuladores Ni-Cd têm um preço inicial mais elevado do que as chumbo-ácido, mas são mais resistentes a variações de temperatura e a condições de sobrecarga. Possuem ainda a vantagem de possibilitarem a sua carga com correntes elevadas o que conduz a um menor tempo de carga. Para além do seu preço inicial elevado, a principal desvantagem das baterias Ni-Cd reside na existência de efeito de memória que obriga a descarregar totalmente a bateria para que não se dê lugar à sua viciação (fenómeno que diminui a tensão fornecida pela bateria). Normalmente são baterias seladas. As baterias Ni-Cd são cada vez menos utilizadas, pois para além do efeito de memória, de terem menor capacidade e de terem um tempo de vida útil menor, são ainda muito poluentes, já que o cádmio é um elemento químico altamente tóxico e prejudicial ao meio ambiente.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Baterias níquel-hidretos metálicos (Ni-MH):

Estas baterias têm uma constituição semelhante às baterias Ni-Cd. Fundamentalmente a diferença introduzida relativamente às baterias Ni-Cd reside na alteração dos materiais que constituem o cátodo (uma liga de elementos metálicos) que serve para anular o indesejável efeito de memória. A bateria de Ni-MH é composta por dois eléctrodos - um de hidróxido de óxido de níquel e o outro por uma liga metálica que armazena hidrogénio – que estão imersos num electrólito de hidróxido de potássio dissolvido em água.

Este tipo de bateria apresenta, contudo, um elevado grau de auto-descarga (a bateria descarrega-se espontaneamente). O ciclos de carga e descarga profundos reduzem a vida útil da bateria. O desempenho degrada-se após 200 a 300 ciclos.

As modernas baterias de Ni-MH fornecem quase mais do dobro de densidade de energia do que as baterias Ni-Cd. As baterias Ni-MH têm substituído as baterias Ni-Cd, apresentando hoje preços muito próximos das baterias de Ni-Cd, não apresentando os problemas de impacto ambiental das baterias Ni-Cd.

Baterias de iões de lítio (Li-ion):

Uma bateria de iões de lítio é constituída por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um electrólito composto por sais de lítio num solvente orgânico (solução não aquosa). Estas baterias são leves e têm um tempo de vida útil elevado. Podem ser carregadas com correntes altas, e tal como as baterias Ni-Cd, admitem uma descarga lenta e suportam uma vasta amplitude de temperaturas de funcionamento. Estas baterias sofrem um processo de envelhecimento, ou seja, perdem a sua capacidade de armazenamento de energia, mesmo que não estejam a ser utilizadas. A temperatura tem um efeito importante no processo de envelhecimento da bateria, pelo que se deve escolher um local com uma temperatura baixa. Um aspecto importante a salientar é que não existem carregadores rápidos para este tipo de baterias.

Carregar estas baterias com tensões elevadas pode fazer com que a bateria sobreaqueça e com que se incendeie ou expluda. Para evitar estes tipos de acidentes as baterias são fabricadas com um circuito de segurança, que interrompe a corrente caso os valores considerados seguros para a bateria sejam excedidos.

Apresentam ainda várias outras vantagens: têm a capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia o que as torna adequadas para equipamentos electrónicos que têm um consumo mais elevado; não têm o efeito de memória, pelo que não é necessário deixar

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

que a bateria se descarregue por completo antes de voltar a carregá-la; não é necessário fazer um primeiro carregamento prolongado como acontece nas baterias de níquel-cádmio.

As principais desvantagens deste tipo de baterias residem na sua baixa eficiência e no preço elevado, apresentando um custo de cerca de 40% mais elevado do que as baterias de Ni-Cd.

Actualmente estão a ser desenvolvidas baterias recarregáveis que se baseiam na tecnologia de iões de lítio mas que procuram eliminar as desvantagens que este tipo de baterias apresenta. Assim, as baterias de Polímeros de lítio (LiMn_2O_4) e as baterias de iões de lítio ferro fosfato (LiFePO_4) reúnem as vantagens das baterias de Ni-Cd relativamente a segurança e durabilidade (são mais resistentes e tolerantes a condições de sobrecarga) mas apresentam as vantagens de uma elevada capacidade e baixo peso características das baterias de iões de lítio.

Baterias de nano titano:

Nestas baterias os eléctrodos são constituídos por materiais de nano titano obtidos a partir da tecnologia nanoescópica. Dado que os eléctrodos são constituídos por partículas não estruturadas o que encurta a distância dentro do eléctrodo, a carga e a descarga é acelerada.

São baterias de longa duração (aproximadamente 20 anos), de carregamento rápido, e seguras (conseguem suportar 240 °C sem explodir), podendo operar num intervalo de temperatura de -50 °C até 75 °C, e com elevada potência. Este tipo de baterias encontra-se ainda numa fase experimental.

Mas para que uma bateria possa funcionar adequadamente será necessário conhecer os métodos de carga de baterias existentes. Pretende-se que um carregador desempenhe três funções: carregue a bateria, optimize a taxa de carga (estabilização) e saiba quando deve parar a carga. A finalização do carregamento é muito importante, dado que se o carregamento continuar activado após a carga da bateria ter atingido o seu valor máximo, a bateria pode ser destruída. Um bom carregador não pode deixar a bateria ultrapassar um determinado limite de temperatura por forma a não colocar em risco a bateria. Um dos métodos mais usuais consiste em parar o carregamento assim que uma determinada tensão seja atingida.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

A seleção de um determinado método de carga deve sempre ter em conta o tipo de bateria em que este será aplicado:

1. Método de carga a corrente constante: é fácil de implementar, conduzindo a circuitos de carga simples e de baixo custo. Apresenta como desvantagens a utilização de correntes elevadas que são prejudiciais quando se pretende carregar baterias sensíveis à sobrecarga, como é o caso das baterias chumbo-ácido. A utilização de correntes baixas conduz a tempos de carga elevados que podem ser inviáveis. Este método pode ser adequado a baterias pouco sensíveis a sobrecarga como as baterias de níquel-cádmio, uma vez que suportam também a utilização de correntes elevadas na sua carga, mas torna-se difícil aplicá-lo nas baterias de chumbo-ácido.
2. Método de tensão constante: a tensão de carga é mantida constante mas a corrente de carga varia ao longo do processo. A corrente é elevada no início do processo de carga e vai diminuindo até atingir valores muito baixos aquando da finalização do processo, o que leva a que a finalização da carga seja muito lenta. A tensão de carga tem de ser ajustada consoante o tipo de bateria a carregar, valores muito elevados da tensão de carga podem conduzir a sobrecarga na fase final da carga e, por consequência, desencadear um processo de aquecimento em cascata em que o aquecimento dá lugar a correntes mais elevadas que, por sua vez, provocam aquecimento por efeito Joule e assim sucessivamente até que ocorra a destruição da bateria.
3. Método de regulação automática: os grandes avanços ao nível da eletrónica permitiram o desenvolvimento de métodos de carga mais sofisticados, muitos deles integrando microcontroladores, que permitem a redução do tempo de carga, bem como a ocorrência de sobrecarga. Este tipo de método de carga é o mais utilizado actualmente e resulta, normalmente, da modificação de um dos métodos referidos anteriormente ou numa combinação dos dois métodos em diferentes etapas do processo de carga. A escolha do método de carga adequado exige um bom conhecimento das características da bateria a que se destina.

Prevê-se que durante os próximos anos haja um aperfeiçoamento de diversas tecnologias e composições químicas das baterias, com o objectivo de maximizar a densidade (Wh/kg) e a capacidade de armazenamento de energia (kWh), a potência (kW) e a potência específica (W/kg), a durabilidade (anos e número de ciclos de carregamento) e de melhorar o

comportamento face a micro ciclos de carregamento. Procurar-se-á minimizar a taxa de auto-descarga, o tempo de carregamento bem como o respectivo custo (Evalue, 2010).

2.4.2 Condensadores

Um condensador é um dispositivo eléctrico formado por dois materiais condutores (armaduras ou placas), separados por um material isolante chamado dieléctrico. Este dispositivo armazena carga eléctrica nas armaduras. O material isolante entre as armaduras impede o fluxo de cargas directamente de uma armadura para a outra.

Para carregar um condensador será aplicada uma dada tensão (V) entre as suas armaduras através de uma fonte de energia eléctrica. Surgirá então um campo eléctrico no dieléctrico entre as armaduras. As cargas manter-se-ão armazenadas nas armaduras (ou seja, o condensador permanecerá carregado) até que seja estabelecido um caminho condutor que permita o fluxo de cargas entre as armaduras.

A capacidade de armazenamento é definida “pela razão constante que existe entre o módulo da carga existente em cada armadura (Q) e a tensão existente entre elas (V)” (Meireles, 2005):

$$C = \frac{Q}{V} = \text{const.}$$

Onde Q representa o módulo da carga existente em cada armadura, V a tensão existente entre as duas armaduras e C a capacidade de armazenamento de um condensador. A capacidade de um condensador é proporcional à área total das armaduras, é inversamente proporcional à distância entre as armaduras do condensador e é proporcional à capacidade isoladora do elemento que separa as armaduras (constante dieléctrica do material isolante²⁶).

Existem dois momentos importantes que devem ser analisados com mais detalhe:

- a. O momento de carregamento do condensador
- b. O momento de descarga do condensador

No momento de carregamento do condensador armazena-se energia no campo eléctrico existente entre as armaduras, que é fornecida através de uma fonte de energia eléctrica.

²⁶ A característica de um dieléctrico que descreve a sua aptidão para armazenar energia (Gussow, 2004).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Definindo a constante de tempo como:

$$\tau = RC$$

onde R representa a resistência do circuito e C a capacidade de armazenamento do condensador, então a corrente i será dada por²⁷:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Onde E representa a força electromotriz da fonte²⁸.

E a respectiva tensão entre as armaduras v_C será dada por:

$$v_C(t) = E - Ri(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Na prática considera-se que a carga do condensador está completa ao fim de um tempo igual a 5τ .

A energia total necessária para o carregamento do condensador será dada por (Meireles, 2005):

$$W = \frac{1}{2} Q_f V_f = \frac{1}{2} \frac{Q_f^2}{C} = \frac{1}{2} C V_f^2$$

Onde V_f representa a tensão máxima final e Q_f a carga máxima final armazenada. Esta quantidade de energia não foi dissipada, ficando armazenada no condensador, sob forma de campo eléctrico existente entre as armaduras, podendo ser devolvida durante a descarga.

No momento da descarga do condensador, isto é, quando existir um percurso electricamente fechado que permita a anulação mútua das cargas nas duas armaduras, criar-se-á uma corrente que será dada por:

$$i(t) = \frac{V_i}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Onde V_i representa a tensão entre as armaduras do condensador no momento inicial da descarga.

²⁷ A demonstração desta relação não faz parte do âmbito desta tese, podendo ser consultada em Meireles, 2005.

²⁸ A força electromotriz (f.e.m.), E, de uma fonte é a razão entre a energia eléctrica produzida no seu interior a partir de outra forma de energia durante um certo intervalo de tempo, W, e a carga, Q, que, durante esse intervalo de tempo, atravessa a sua secção recta (Meireles, 2005).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

A expressão para a tensão v_c será:

$$v_c(t) = Ri(t) = V_i e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Na prática considera-se que a descarga está completa ao fim de um tempo igual a 5τ .

Um condensador convencional apresenta as seguintes desvantagens:

- + Baixo armazenamento de energia / reduzida densidade de energia (inferior à das baterias);
- + Descarga rápida da energia armazenada.
- + Tensão variável: no estado de carga máxima a tensão é alta e à medida que o condensador é descarregado a tensão vai caindo (ter-se-ão de prever eventualmente circuitos estabilizadores da tensão).

Actualmente utilizam-se os supercondensadores, ou *electrochemical double-layer capacitors (EDLCs)* que são condensadores electroquímicos que têm uma elevada densidade energética quando comparados com os condensadores convencionais. Estes componentes estão dimensionados para uma vida útil de 10 anos a uma temperatura de funcionamento de 25° C.

Os EDLCs não possuem qualquer dieléctrico, mas socorrem-se do fenómeno designado por *electric double layer*. Devido à natureza porosa do carbono, a área da superfície é extremamente grande, o que se traduz numa alta capacidade.

Os condensadores são constituídos por um eléctrodo positivo, um eléctrodo negativo, um separador entre os dois eléctrodos e um electrólito que enche as porosidades dos dois eléctrodos e os separadores.

Os EDLCs apresentam as seguintes vantagens:

- + Alto armazenamento de energia: quando comparado com a tecnologia convencional de condensadores
- + Baixa resistência de série equivalente: quando comparado com baterias, os EDLCs têm uma baixa resistência interna, tendo por isso uma capacidade elevada de densidade de potência
- + Rápida carga e descarga: os EDLCs carregam e descarregam através da absorção ou libertação de iões, o que associado a uma baixa resistência interna permite a carga e descarga de correntes elevadas.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Os EDLCs apresentam as seguintes desvantagens:

- + Baixa tensão por cada célula: as células EDLC têm uma tensão típica de 2,7 V. Para tensões superiores será necessário interligar várias células em série.
- + Não podem ser utilizadas em circuitos de corrente alternada e em circuitos com elevadas frequências devido à sua constante de tempo.

O ultracondensador pode ser carregado a partir de qualquer fonte de corrente contínua, bateria ou célula solar. É necessário garantir que a tensão de carga não exceda a tensão característica.

Os EDLCs podem ser modelizados como um circuito RC. Desta forma a carga armazenada é dada por $Q = CV$

A energia armazenada no condensador em Joules é dada por:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

A constante de tempo será definida por:

$$\tau = C \frac{(V_0 - V_1)}{I}$$

Com V_0 = tensão inicial (V), V_1 = tensão final após t(s) e I = corrente constante da carga (A)

O ultracondensador pode ser utilizado para disponibilizar potência ao longo de vários minutos a uma carga, pelo que será importante conhecer a sua capacidade (C).

Ao contrário das baterias, os ultracondensadores podem ser operados num espectro alargado de tensão, desde a sua tensão nominal até zero volts, devido à sua concepção técnica.

A energia total que pode ser armazenada num untracondensador é dada por:

$$W = \frac{1}{2} C (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)$$

Os ultracondensadores têm uma característica única: podem ser carregados e descarregados à mesma taxa. Logo, a corrente nominal indicada é válida quer para a carga, quer para a descarga.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Dimensionamento

Para se determinar o ultracondensador certo a utilizar têm de ser conhecidos vários factores:

- + Tensões máxima e mínima de operação
- + A corrente média ou a potência necessária
- + A temperatura ambiente de funcionamento
- + O tempo de funcionamento
- + O tempo de vida útil pretendido

Dado que a tensão da célula é normalmente inferior à tensão necessária, ter-se-á de prever a instalação de diversas células em série. Para a determinação do número de células necessário aplica-se a seguinte fórmula:

$$n^{\circ} \text{ células em série } (n) = \frac{V_{\max}}{V_r}$$

Com V_{\max} = tensão máxima de operação e V_r = tensão nominal de cada célula.

Conhecendo a corrente média necessária (em A), o tempo de funcionamento em segundos (ΔT) e a tensão mínima de operação (V_{\min}) é possível calcular a capacidade aproximada necessária através da fórmula:

$$C_{\text{sys}} = \frac{I\Delta T}{(V_{\max} - V_{\min})}$$

Com C_{sys} = capacidade das células em série.

Sabe-se que a capacidade total de um sistema com células em série é dada por:

$$\frac{1}{C_{\text{sys}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Dado que C_1 , C_2 , C_n têm o mesmo valor, pode utilizar-se a seguinte fórmula:

$$C_{\text{sys}} = \frac{C}{n}$$

Pelo que a partir de células standard do fabricante, se pode definir o número de células necessárias a instalar em série.

2.4.3 Soluções Mistas

Por força da necessidade de armazenar energia em veículos eléctricos, surgiram mais recentemente soluções mistas que combinam baterias com supercondensadores, designadas por *Hybrid Energy Storage Systems* (HESS). Desta forma pretende-se aliar as vantagens individuais de cada sistema: a alta densidade de potência do supercondensador, com a alta densidade de energia da bateria. Esta solução mista permite elevadas potências de descarga (e carga, por exemplo em travagens regenerativas) sem perda de longevidade das baterias, pois os supercondensadores absorvem e fornecem todos os picos eléctricos que seriam nocivos para as baterias.

O sistema misto é composto por um conjunto de baterias, um conjunto de supercondensadores e um conversor DC-DC.

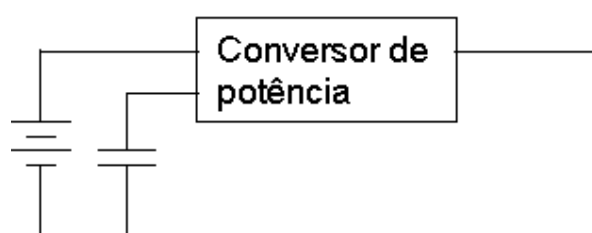


Figura 15 – Configuração do sistema misto bateria / supercondensador
Fonte: Autor, 2013

A ligação em paralelo dos dois componentes de armazenamento tem de ser executada de uma forma adequada, dado que as baterias e os supercondensadores têm um comportamento dinâmico fundamental distinto. As baterias são sistemas de armazenagem químicos: durante a sua carga e descarga a tensão mantém-se, em princípio, constante. Os supercondensadores são sistemas de armazenagem electrostáticos: a tensão varia proporcionalmente à carga Q .

Estudos entretanto realizados por alguns fabricantes (por exemplo a Maxwell, 2010) permitem demonstrar que os supercondensadores em combinação com as baterias (por exemplo de chumbo-ácido) aumentam a performance e a vida de útil destas últimas.

Dado tratar-se de uma tecnologia ainda não totalmente madura que se encontra em fase de aperfeiçoamento, optou-se por não a considerar na presente tese.

2.5 A eficiência energética nos ascensores

Eficiência energética será, segundo Castanheira e Borges Gouveia (2004), uma estratégia de consumir o mínimo possível de energia para a realização de qualquer trabalho, quer

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

através da supressão de consumos, quer através da utilização de tecnologias mais eficientes.

A Directiva 2012/27/UE define “eficiência energética”, como rácio entre o resultado em termos do desempenho, serviços, bens ou energia gerados e a energia utilizada para o efeito e “melhoria da eficiência energética”, como aumento de eficiência energética resultante de mudanças tecnológicas, comportamentais e/ou económicas. Uma das opções disponíveis consistirá na utilização final mais eficiente da electricidade.

No âmbito desta tese, melhoria da eficiência energética será entendida como sendo os procedimentos que visam a redução do custo e do consumo de energia, procurando obter-se o melhor resultado, maximizando o efeito útil (transformação da energia eléctrica em energia mecânica, por exemplo) e minimizando as perdas do sistema (electromecânico).

Segundo a Directiva 2009/125/CE, muitos dos produtos relacionados com o consumo de energia podem ser significativamente melhorados para reduzir os impactos ambientais e realizar poupanças de energia, através da melhoria da sua concepção, o que leva em simultâneo a uma economia de custos para as empresas e para os consumidores finais. A concepção ecológica dos produtos constitui um elemento essencial da estratégia comunitária para a política integrada dos produtos. Sendo uma abordagem preventiva, que visa otimizar o desempenho ambiental dos produtos, ao mesmo tempo que conserva as respectivas características funcionais, apresenta novas e efectivas oportunidades para o fabricante, o consumidor e a sociedade em geral.

A eficiência energética não era discutida até há alguns anos pela indústria de ascensores. Contudo, o aumento substancial do custo da energia eléctrica associado à relevância da temática das alterações climáticas e à sustentabilidade, conduzam ao rápido aumento de importância da temática da melhoria da eficiência energética em ascensores.

Quando se faz uma avaliação do consumo global de energia eléctrica de um ascensor deverá ter-se em atenção três factores (Cariani *et. al.*,2010):

- a. o consumo de energia eléctrica durante a viagem (operação): o ascensor encontra-se em movimento;

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

- b. o consumo de energia eléctrica durante o *stand-by*²⁹: o ascensor não está em operação, mas aguarda a vinda do próximo passageiro;
- c. a relação entre os dois modos de operação anteriores (a relação de tempo entre o modo movimento e o modo *stand-by*), isto é, a frequência de utilização do ascensor.

Segundo os autores, os dois primeiros factores são características tecnológicas dos componentes do sistema, que são fixas ao longo da fase de utilização do ascensor. Já o terceiro factor resulta essencialmente de factores exógenos que não dependem dos componentes utilizados, como a frequência de utilização do ascensor (o número de viagens realizadas anualmente pelo ascensor).

As causas das ineficiências energéticas nos ascensores podem ser subdivididas em dois grupos: as causas directas e as causas indirectas (Almeida et. al. 2010).

As perdas directas são:

- a. perdas por atrito;
- b. perdas de transmissão (mecânicas);
- c. perdas no motor: perdas no estator, no rotor;
- d. perdas no sistema de travagem;
- e. perdas na iluminação;
- f. e perdas no autómato, instalação eléctrica e conversor electrónico de frequência.

As perdas indirectas estão relacionadas com a operação do equipamento e prendem-se com o comportamento do utilizador ou com as opções de gestão de tráfego.

Segundo Palma (2008), um sistema de accionamento electromecânico de velocidade variável, que permite o ajuste de velocidade, de posição ou de binário, dentro de certas gamas de variação, é constituído pelos seguintes componentes:

1. Fonte de energia eléctrica;
2. Conversor estático de potência ;
3. Máquina eléctrica, incluindo a transmissão;
4. Sistema mecânico movido, ou a carga;
5. Órgãos electrónicos de controlo e de comando.

²⁹ Estado em que se encontra o ascensor quando não está em movimento (ascendente ou descendente). O consumo de energia eléctrica em *stand-by* é provocado por vários componentes do ascensor, nomeadamente, o comando, as sinalizações e botões de chamada nos patamares e na cabina, a cortina fotoeléctrica, o conversor electrónico de frequência, a luz de cabina continuamente ligada e o motor de porta de cabina constantemente em carga para garantir que a porta de mantém fechada.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Num sistema electromecânico de conversão de energia³⁰, da energia absorvida uma parte é integralmente convertida, outra parte encontra-se armazenada e uma pequena parte é dissipada, ou seja, existirão perdas.

Atendendo em mais pormenor ao sistema electromecânico, porque é sobre este sistema que recai o presente estudo, as principais perdas a considerar são:

Perdas eléctricas:

A passagem de corrente eléctrica nos condutores do circuito eléctrico traduz-se numa perda de energia motivada pelo efeito de Joule, que provoca a libertação de calor nos condutores eléctricos em que está a passar uma corrente eléctrica devido à resistência que o metal oferece à passagem dessa mesma corrente eléctrica (Guedes, 2001). As perdas eléctricas variam com o quadrado do valor da corrente que atravessa os condutores.

Perdas no ferro:

É a soma das perdas de energia motivadas pela acção de um campo magnético variável no tempo, devidas à histerese magnética do material ferromagnético e às correntes de *Foucault* que circulam nesse material:

- a. Perdas por histerese: durante o ciclo de magnetização do material ferromagnético é gasta uma quantidade de energia no trabalho de orientação dos domínios magnéticos. No volume do material que constitui o núcleo magnético, esta energia é dissipada sob a forma de calor. As perdas por histerese variam com o tipo de material ferromagnético utilizado e proporcionalmente com o volume do mesmo.
- b. Perdas por correntes de *Foucault*: a variação no tempo do fluxo magnético dá origem ao aparecimento de um campo eléctrico no meio magnético do núcleo. Nesse meio metálico formam-se circuitos fechados nos quais se induz uma força eletromotriz, que por sua vez provoca a circulação de uma corrente eléctrica. Como os circuitos fechados têm uma dada resistência eléctrica, a circulação da corrente eléctrica nesses circuitos traduz-se por uma libertação de calor, por efeito de Joule (Guedes, 2001). As perdas por correntes de *Foucault* são simplesmente a manifestação da lei de *Faraday* no ferro.

³⁰ Como é o caso presente do ascensor.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Perdas mecânicas:

Agrega as:

- a. Perdas por atrito nos apoios e rolamentos de todos os componentes móveis do sistema, quer da própria máquina, quer das rodas de desvio;
- b. Perdas por arrastamento: as peças móveis em rotação provocam um arrastamento do meio envolvente (ar), produzindo um binário resistente;
- c. Perdas resultantes do atrito das roçadeiras ou rodas da cabina e do contrapeso nas guias.

Toda a energia de perdas – perdas eléctricas, magnéticas e mecânicas – degrada-se em calor. Devido às perdas de energia e durante o funcionamento do sistema electromecânico há um aumento da sua temperatura. Este aumento traduz-se no aquecimento do motor (Guedes, 2001).

A potência útil é igual à potência absorvida menos as perdas (Alves, 2003). O rendimento η é definido como a potência útil P_u a dividir pela potência absorvida ou potência total P_t :

$$\eta = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência total}} = \frac{P_u}{P_t}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{\text{Potência total} - \text{Potência de perdas}}{\text{Potência total}} = 1 - \frac{\text{Potência de perdas}}{\text{Potência total}}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência útil} + \text{Potência de perdas}}$$

Estas diferentes expressões permitem sempre caracterizar o rendimento do sistema em função das grandezas eléctricas. Como existem sempre perdas na conversão de energia efectuada pelos sistemas electromecânicos, estes têm um determinado rendimento energético, que será sempre inferior a 100%.

Para um ascensor poderão considerar-se os seguintes rendimentos para diferentes componentes ou soluções construtivas:

1. máquina com redutor com motor assíncrono: $\eta = 60\%$ ³¹

³¹ Fonte: Almeida *et. al.* (2010)

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

2. máquina sem redutor com motor síncrono: $\eta = 90\%$ ²⁹
3. suspensão 2:1 (normalmente utilizada em sistemas com máquinas sem redutor: $\eta = 90\%$ ²⁹
4. conversores electrónicos de frequência: $\eta = 90\%$ ²⁹
5. caixa do ascensor: arcada tipo mochila (suspensão lateral) $\eta = 70\%$ ³²
6. caixa do ascensor: arcada com suspensão central: $\eta = 90\%$ ³⁰

A indústria de ascensores tem procurado corresponder às solicitações do mercado relativamente às questões de eficiência energética. Franco e Ferreira (2009) apresentam, entre outras diversas sugestões para a melhoria da eficiência energética nos ascensores:

1. Para novos ascensores:
 - a. Introdução de novas soluções construtivas mecânicas:
 - i. Cabinas suspensas ao centro da mesma, dado que reduzem o atrito gerado sobre as guias. Segundo Küntscher (2006), para ascensores com suspensão lateral, o rendimento da caixa do ascensor será de aproximadamente 70%. Já para ascensores com suspensão central, o rendimento da caixa do ascensor será de aproximadamente 90%.
 - ii. Recurso a roçadeiras ou rodas que gerem menos atrito sobre as guias.
 - iii. Recurso a cabinas executadas em materiais mais leves (cabins mais leves implicam contrapesos com menos massa) e logo máquinas de tracção com menor potência.
 - b. Máquinas de tracção mais eficientes: como se viu no ponto 2.2 o estado da arte é a instalação de máquinas com roda de aderência com motor síncrono com ímanes permanentes.
 - c. Comandos inteligentes, dotados do modo *sleep*, desligando selectivamente alguns dos componentes do comando durante as “horas mortas” do edifício. Estes comandos devem ainda permitir realizar uma gestão activa do tráfego de passageiros.
 - d. Conversores electrónicos de frequência de alto rendimento, dotados de modo *sleep*³³, sendo reactivados apenas quando surge um comando externo a

³² Fonte: Küntscher (2006)

³³ Estes serão desligados quando o ascensor não estiver a ser utilizado, ou seja, quando se encontrar em modo *stand-by*.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

partir da cabina ou do patamar. Desta forma conseguir-se-á uma redução de até 50% do consumo energético provocado pelo conversor convencional.

- e. Outros componentes: a luz de cabina (que é realizada por *leds*) é temporizada, desligando-se 3 minutos após a última manobra realizada. O motor da porta de cabina deixa de estar continuamente em carga para garantir que a porta de cabina se mantém fechada, mesmo quando o ascensor está imobilizado / em *stand-by*.

2. Para ascensores já instalados:

- a. Na grande maioria dos ascensores instalados, o autómato está sempre activo (mesmo quando a máquina de tracção está imobilizada durante longos períodos de tempo) para poder reagir de imediato a um comando externo. Paralelamente está a controlar continuamente todas as seguranças do ascensor. Estes comandos devem ser substituídos pelos modernos comandos inteligentes (descritos no ponto 1., em cima).
- b. Substituição das máquinas com redutor por máquinas sem redutor de ímanes permanentes.
- c. Aplicação de um conversor electrónico de frequência de última geração. Se não se pretender substituir também o comando e a instalação existente do ascensor, poder-se-á optar pela solução *Liftcomfort*³⁴.

Mas a melhoria da eficiência energética nos ascensores (quer nos já instalados, quer nos novos) poderá passar ainda pelo aproveitamento da energia recuperada, como se irá apresentar nos próximos capítulos.

2.5.1 A recuperação de energia

Um sistema electromecânico de conversão de energia é composto por:

- a. Circuitos eléctricos: conjunto de órgãos destinados a conduzir a corrente eléctrica e a provocar o aparecimento de um campo electromagnético de ligação. São formados pelos elementos do circuito eléctrico do indutor e do circuito eléctrico do induzido.
- b. Circuito magnético: circuito de distribuição orientada das linhas de força do campo magnético, normalmente construído com material ferromagnético, que é responsável pela existência de um campo magnético intenso na zona em que se pretende

³⁴ Ver nota de roda-pé 13.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

aproveitar os seus efeitos. Encontra-se distribuído pela parte móvel e pela parte fixa do sistema electromecânico de conversão de energia.

- c. Órgãos mecânicos: conjunto de órgãos necessários para conduzir a energia mecânica até à zona onde se dá a conversão de energia. São constituídos pelo veio da máquina, pelos mancais e pela carcaça (Guedes, 2001).

A análise do funcionamento de um sistema electromecânico de conversão de energia baseia-se na sua análise energética. Neste sistema existe armazenamento de energia, conversão de energia e dissipação de energia, tanto na parte electromagnética como na parte mecânica.

Nos sistemas electromecânicos do tipo electromagnético a conversão electromecânica de energia traduz-se por uma transformação de energia entre um sistema eléctrico e um sistema mecânico através de um campo magnético de ligação. O processo pode ser reversível, excepto para uma pequena parte da energia que se degrada em calor (as perdas).

As exigências mecânicas de serviço (traduzidas por requisitos de evolução da velocidade e/ou posição ao longo do tempo), implicam da parte da máquina eléctrica e do conversor a montante a disponibilidade para estabelecer binários e velocidades e, conseqüentemente, potências com amplitudes e sentidos adequados ao longo do tempo. Assim, a energia eléctrica a ser transformada pelo conversor deve poder fluir, em cada instante, no sentido conveniente (Palma, 2008).

A máquina de tracção de indução pode funcionar em três modos diferentes – ver figura 16 (Beleza Carvalho, 2008):

- + Em modo motor, o rotor irá girar na direcção do campo magnético girante do estator. Este será o modo de funcionamento natural da máquina de indução. Em regime permanente, a velocidade da máquina será inferior à velocidade síncrona.
- + Em modo gerador, a máquina de indução vai produzir um binário gerador, isto é, um binário que actuará em oposição à rotação do rotor. Neste processo, a velocidade instantânea do sistema é superior à velocidade síncrona, devido à inércia do sistema. Como resultado, a acção geradora da máquina de indução irá causar uma inversão no sentido do fluxo da potência, e a energia cinética do sistema poderá ser fornecida à fonte de alimentação. Este processo é conhecido como frenagem regenerativa.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

- + Em modo freio, o sistema girará em direcção oposta ao campo girante do estator e o binário desenvolvido será na direcção do campo girante, mas em oposição ao movimento do rotor. Este binário é um binário de frenagem. Este modo de operação é por vezes utilizado em sistemas onde se pretende parar rapidamente o motor. Para efeitos da presente tese, este modo não será considerado.

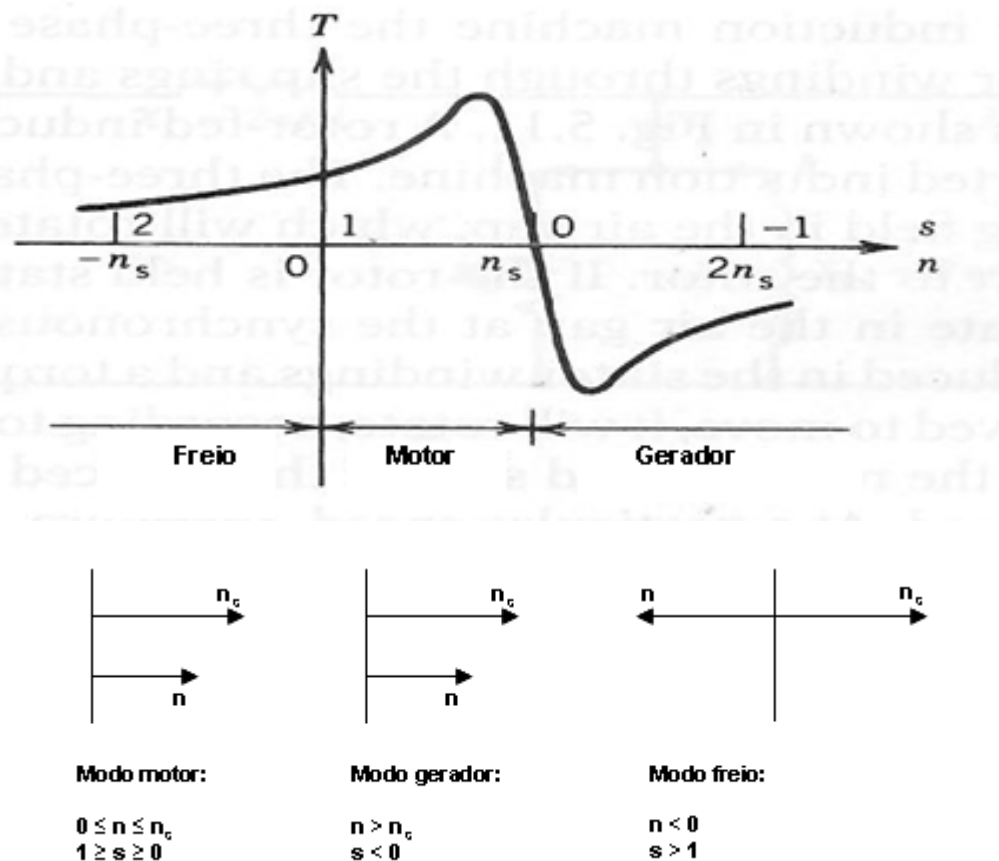


Figura 16 – Os três modos de funcionamento da máquina de indução
 Fonte: Beleza Carvalho (2008)

Aos sistemas electromecânicos de conversão de energia aplica-se o princípio da conversão da energia (Guedes, 2001):

A energia total consumida pelo sistema = energia útil fornecida pelo sistema + aumento da energia armazenada no campo de ligação + energia dissipada em perdas

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

A conversão de energia pode dar-se em vários sentidos:

a. Quando o sistema funciona como gerador³⁵, isto é, promove a conversão de energia mecânica em energia eléctrica com perdas de energia, a aplicação do princípio da conservação de energia leva ao seguinte balanço energético:

(energia mecânica consumida – energia de perdas mecânicas) = (energia eléctrica fornecida + energia de perdas eléctricas) + (aumento de energia armazenada no campo magnético + a energia dissipada em perdas magnéticas).

Neste modo, a energia que é recuperada é injectada no barramento DC do conversor. Nesta condição, o sistema não está a ser alimentado pela rede eléctrica do edifício.

b. Quando o sistema funciona em modo motor³⁶, promovendo a conversão de energia eléctrica em energia mecânica com perdas de energia, a aplicação do princípio da conservação de energia leva ao seguinte balanço energético:

(energia eléctrica consumida – energia de perdas eléctricas) = (energia mecânica fornecida + energia de perdas mecânicas) + (aumento de energia armazenada no campo magnético + a energia dissipada em perdas magnéticas).

O sistema é alimentado pela rede eléctrica do edifício.

Nos ascensores, a energia potencial é constantemente transferida enquanto a cabina está em movimento. Se, por exemplo, a cabina se estiver a movimentar em sentido descendente com plena carga, ou em sentido ascendente, mas vazia, o motor estará a ser movimentado pela carga e a “segurar” a cabina. Tipicamente, a energia gerada (frenagem) no motor será então dissipada na resistência de frenagem ou recuperada com a ajuda do conversor electrónico de frequência (VVVF) e reaproveitada (como se irá ver no capítulo 4).

³⁵ Uma máquina primária fornece ao sistema energia mecânica através da sua parte móvel. A energia mecânica é caracterizada por um binário motor T_m que faz rodar a parte móvel do sistema com uma determinada velocidade de rotação n_r . Esse movimento da parte móvel provoca um movimento relativo entre o campo magnético indutor e os condutores eléctricos onde vai ser induzida uma força electromotriz. Quando o gerador está fechado sobre uma carga, nos condutores do induzido circula uma corrente eléctrica que dará origem ao aparecimento de uma força mecânica nos condutores, que se opõe ao movimento desses condutores. Devido aos aspectos construtivos do sistema de forças que actuam sobre os diversos condutores do circuito induzido dão origem a um binário que se opõe ao binário motor aplicado à máquina: é o binário resistente da máquina T_r .

³⁶ Uma fonte de alimentação fornece ao sistema energia eléctrica através dos seus terminais. A corrente eléctrica que circula nos condutores que se encontram no interior do campo magnético indutor provoca o aparecimento de uma força mecânica nos condutores. Devido aos aspectos construtivos do sistema de forças que actuam sobre os diversos condutores do circuito induzido dão origem a um binário que promove o movimento da parte móvel com uma velocidade n_r : o binário motor. Quando o motor está ligado a uma carga mecânica, a velocidade da parte móvel é tal que se dá o equilíbrio mecânico do sistema. Estabelece-se assim um movimento que impõe uma velocidade relativa entre os condutores do induzido e o campo magnético indutor. Por isso nos condutores eléctricos do induzido vai induzir-se uma força electromotriz com um sentido que se opõe ao crescimento da corrente eléctrica no circuito eléctrico induzido.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Quando a cabina se movimenta em sentido descendente, e o peso na cabina é superior ao peso do contrapeso, então o binário do motor encontra-se em sentido contrário à velocidade, isto é, o motor está a travar, havendo lugar à recuperação de energia.

A energia acumulada em forma de energia potencial nas pessoas e no contrapeso pode ser recuperada, dado que o motor está a funcionar como um gerador. Na figura 17 apresentam-se situações em que a máquina funciona em modo motor (situações indicadas nas duas figuras centrais: aceleração) e em modo gerador (primeira figura a contar da esquerda e primeira figura a contar da direita: travagem).

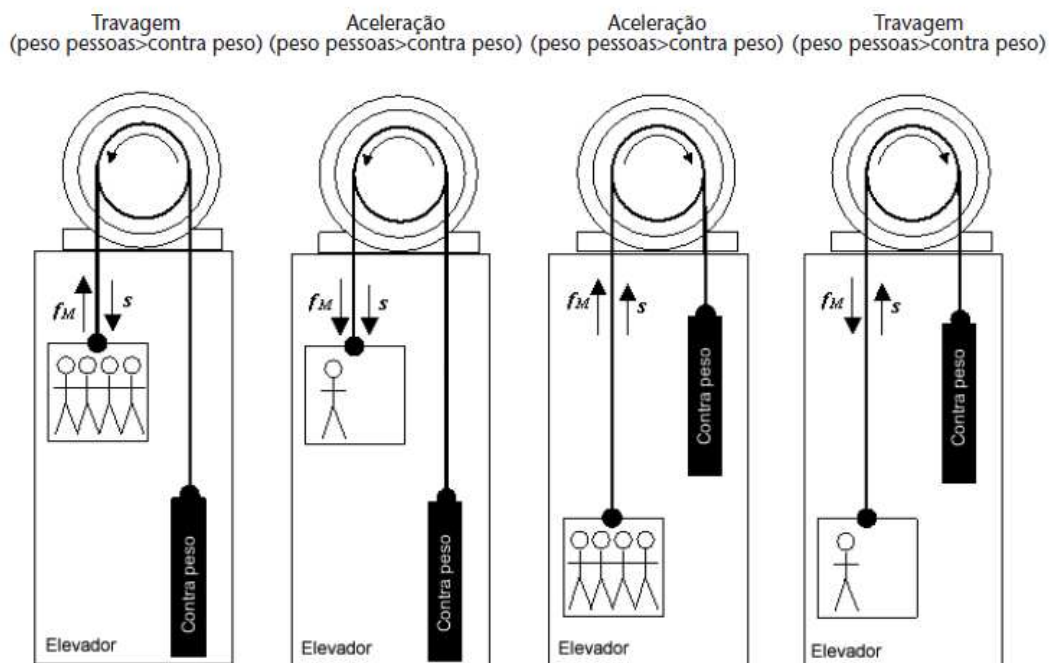


Figura 17 – Quando o ascensor funciona em modo motor e em modo gerador

Fonte: Almeida, 2005

Teoricamente, e se não existissem perdas, a energia regenerada deveria ser igual à energia utilizada em modo motor. Contudo, devido às perdas por atrito (atrito nas guias, e resistência do ar), às perdas do motor (perdas no cobre, perdas no entreferro, perdas de ventilação, perdas mecânicas), e em máquinas com redutor, às perdas mecânicas no redutor, a energia recuperada será sempre inferior à energia absorvida pelo sistema.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Nipkow (2005) estima que para ascensores pequenos (630 kg, 1,6 m/s) o grau de recuperação de energia³⁷ seja inferior a 30%, enquanto que para grandes equipamentos (2200 kg, 2,5 m/s) esta possa ser de aproximadamente 40%. A recuperação será possível durante o período de funcionamento estável, reduzindo-se o potencial de recuperação em ascensores com cursos menores.

O que acontece com a energia produzida em modo gerador? Tradicionalmente, nos ascensores eléctricos de roda de aderência, a energia recuperada é dissipada para o ambiente através de uma resistência própria – a resistência regenerativa.

Como se irá ver pretender-se-á dar outra utilização à energia recuperada, seja para alimentar directamente outras cargas, seja para armazenamento e posterior utilização da energia na alimentação do próprio ascensor.

2.5.2 Modelização física da recuperação da energia

Segundo Palma (2008) as partes móveis dos accionamentos envolvem quase sempre fenómenos complexos, quer pela multiplicidade dos seus detalhes, quer pela sua própria natureza, muitas vezes, não linear.

Contudo, como o objectivo da modelação é a utilização em sistemas de controlo onde intervêm diversos outros subsistemas, com destaque para os eléctricos, os electrónicos e os mecânicos, procuram-se modelos matemáticos tão simples quanto possível para cada um deles. Para muitos dos sistemas electromecânicos que se pretende modelizar pode considerar-se simplificada a seguinte equação de comportamento dinâmico, baseada na lei fundamental da dinâmica para um sistema rotativo:

$$T_m - T_r = J \frac{d\omega}{dt}$$

Onde T_m representa o binário motor (expresso em Nm), T_r o binário resistente (expresso em Nm), J o momento de inércia do sistema (expresso em kgm^2) e $\frac{d\omega}{dt}$ a aceleração angular ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$).

O momento de inércia será calculado a partir de:

$$T \cdot \omega = F \cdot v \Leftrightarrow J \frac{d\omega}{dt} \omega = m \cdot a \cdot v \Leftrightarrow J \frac{d\omega}{dt} \omega = m \cdot \frac{d\omega}{dt} r \cdot \omega \cdot r \Leftrightarrow J = m \cdot r^2$$

³⁷ Define-se grau de recuperação de energia como a relação da energia recuperada face à energia total necessária para realizar a manobra de subida e de descida de um ascensor (nas condições descritas na norma VDI 4707:2009).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Onde m representa a massa suportada pela roda de tracção e r o raio da roda de tracção da máquina.

A potência mecânica do sistema será obtida a partir de:

$$P = F \cdot v = T \cdot \omega \Rightarrow T = \frac{F \cdot v}{\omega}$$

Sendo a velocidade linear v , dada por:

$$v = \omega \cdot r$$

Como sob o ponto de vista electrotécnico todo o sistema de accionamento electromecânico está subordinado ao motor eléctrico ter-se-á de reduzir as diferentes grandezas mecânicas envolvidas ao eixo motor. Nessa redução utiliza-se o Princípio da Conservação da Energia.

A energia cinética é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2$$

Então, para o todo o sistema será válida a seguinte relação:

$$E_{c1} = E_{c2} \Rightarrow \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 = \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 \Leftrightarrow J_1 \omega_1^2 = J_2 \omega_2^2$$

Em seguida proceder-se-á à descrição detalhada da modelização. Na modelização de um sistema electromecânico de conversão de energia, o modelo matemático correspondente aos efeitos do campo magnético é determinado a partir de uma análise energética do sistema baseado no Princípio da Conservação da Energia.

Na parte eléctrica existe dissipação de energia na resistência eléctrica do circuito, mas não existe armazenamento

No circuito magnético existe dissipação de energia e existe armazenamento. Por isso, considera-se que a energia necessária para realizar o trabalho de estabelecimento de um campo magnético num circuito de material ferromagnético fica armazenada no próprio campo magnético desde que o sistema seja fechado e não haja alteração de temperatura. O valor da energia armazenada é igual ao valor do trabalho necessário para estabelecer o campo.

As máquinas eléctricas rotativas têm uma parte móvel animada de um movimento de rotação em torno de um eixo.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

À parte móvel do sistema electromecânico de conversão de energia – o rotor – que tem uma massa M é aplicado um binário³⁸ motor T_m , e outros binários resistentes T_r . O binário resultante é responsável pelo movimento rotativo da parte móvel do sistema em torno de um eixo.

No rotor não actua apenas o binário resultante dos efeitos electromagnéticos que se pretendem aproveitar, mas também outros binários resultantes de outros fenómenos físicos. Para além do binário electromagnético (motor) $T_m=T_{el}$, existe um binário de inércia T_j , um binário de atrito T_{atr} e um binário de reposição T_{rep} (que muito raramente existe nos sistemas electromecânicos de conversão de energia rotativos). Quando um corpo rígido está animado de um movimento de rotação, o binário de inércia é igual ao produto do momento de inércia J pela sua aceleração angular:

$$T_j = J \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Sistema em modo gerador:

Quando o sistema electromecânico de conversão de energia funciona como gerador, é-lhe fornecida energia mecânica, a partir de uma máquina primária.

Uma parte (pequena) dessa energia mecânica alimenta as perdas mecânicas, outra parte (pequena) fica armazenada nas massas em movimento, e outra parte é integralmente convertida em energia eléctrica. Dessa energia eléctrica uma parte (pequena) alimenta as perdas eléctricas e magnéticas, e a parte restante (potência útil) fica disponível nos terminais eléctricos da máquina.

A máquina primária fornece ao gerador eléctrico uma potência mecânica total dada por

$$P_t = T_m \omega_r$$

A ligação entre a máquina primária e o gerador pode ser feita através de uma caixa de engrenagens, normalmente com uma função de multiplicador da velocidade de rotação.

A potência mecânica absorvida pelo gerador alimenta as perdas mecânicas do sistema electromecânico de conversão de energia e acumula-se nas massas em movimento. A restante potência é integralmente convertida numa potência eléctrica, que no máximo terá o valor estabelecido para a potência nominal do sistema:

$$P_{tr} = T_{el} \omega_r = P_t - P_{mec}$$

³⁸ Por binário entende-se um sistema de duas forças de igual intensidade, de sentidos contrários e pontos de aplicação diferentes mas que não estão situados sobre a mesma linha recta. O efeito de um binário sobre o corpo a que está aplicado é imprimir-lhe um movimento de rotação em torno de um eixo perpendicular ao plano do binário.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

A potência transformada, depois de alimentar as perdas eléctricas e magnéticas, fica reduzida ao valor que é solicitado pela carga aplicada aos terminais eléctricos do sistema.

No processo de conversão de energia surgirá um binário resistente que a máquina primária terá de vencer: o binário electromagnético resistente T_{el} .

Desta forma, a equação mecânica de equilíbrio para um sistema electromecânico de conversão de energia rotativo funcionando como gerador é dada por:

$$T_m = \left(J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \right) + T_{el}$$

O valor do binário de atrito $D\omega_r$ pode ser desprezado face ao valor do binário de inércia.

Sistema em modo motor:

Quando o sistema electromecânico de conversão de energia funciona como motor, é-lhe fornecida energia eléctrica a partir de uma fonte de alimentação. Uma parte (pequena) dessa energia eléctrica alimenta as perdas eléctricas e magnéticas e outra parte é integralmente convertida em energia mecânica. Dessa energia mecânica uma parte (pequena) alimenta perdas mecânicas, outra parte (pequena) fica armazenada nas massas em movimento, e a parte restante (potência útil) fica disponível no veio da máquina.

A fonte de alimentação fornece ao motor eléctrico uma potência eléctrica total, que depois de alimentar as perdas eléctricas e magnéticas é integralmente convertida numa potência mecânica: $P_{tr} = T_{el}\omega_r$

A potência transformada, depois de alimentar as perdas mecânicas, e de se acumular nas massas em movimento do sistema, apresenta-se no veio da máquina sob a forma de potência útil: $P_u = T_m\omega_r = T_{res}\omega_r$, que será sempre igual à potência resistente solicitada pela carga mecânica.

No processo de conversão de energia surgirá um binário motor que tenderá a vencer o binário solicitado pela carga: o binário electromagnético motor T_{el} .

Desta forma, a equação mecânica de equilíbrio para um sistema electromecânico de conversão de energia funcionando como motor é dada por:

$$T_{el} = \left(J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \right) + T_m = \left(J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \right) + T_{res}$$

É frequente desprezar-se a influência do atrito face ao valor da influência da inércia.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O aproveitamento da energia mecânica disponível no veio de uma máquina pode ser feito directamente ou através de um sistema de conversão de movimento, como uma caixa de engrenagens. Esta permitirá ligar o motor a uma carga que tem uma velocidade diferente da do motor ou aumentar o valor do binário e diminuir a velocidade disponível no veio da máquina.

No caso dos ascensores, uma carga animada da velocidade linear v é movimentada por uma máquina ligada a um sistema electromecânico de conversão de energia que roda a uma velocidade angular ω_m através de um redutor de velocidade com o rendimento η_r . Nesta situação, a conservação da energia no sistema permite escrever a equação:

$$Fv = \eta_r(T\omega_m)$$

O binário de carga referido ao eixo do motor é dado por :

$$T = \frac{Fv}{(\eta_r\omega_m)}$$

A força do sistema reduzida ao ponto de aplicação da carga é dada por:

$$F = \frac{\eta_r(T\omega_m)}{v}$$

É de salientar, como considerações adicionais, os seguintes aspectos:

1. o problema das perdas adicionais que surgem nos sistemas electromagnéticos de conversão de energia devido a fenómenos electromagnéticos originados pelo campo magnético de fugas, pela variação rápida dos campos magnéticos presentes no sistema e por aspectos construtivos naturais, resultantes do desenho do circuito magnético deveriam ser considerados. Dado ser um problema de complexa análise, e por apresentar um valor pequeno que se distribui por todos os órgãos do sistema ,estas perdas adicionais não são consideradas no modelo (Guedes, 2001).
2. um modelo é uma abstracção da realidade, que devido à multiplicidade e complexidade dos aspectos que representa nunca chegará a representar completamente essa realidade.

Apresenta-se no anexo 3 o modelo de base do ascensor eléctrico com roda de aderência para um dado ascensor instalado. Os valores teóricos obtidos foram comparados com os dados obtidos por medição nesse ascensor.

2.5.3 Normas sobre eficiência energética para ascensores

Como calcular o consumo de energia de um ascensor em movimento ao longo de um ano? Por um lado o número de viagens realizadas é um factor determinante para o cálculo do consumo de energia do ascensor em movimento. Por outro lado, ter-se-á de determinar ainda qual o consumo que o ascensor terá em *stand-by* ao longo do mesmo ano.

Idealmente deveria medir-se o consumo energético de cada ascensor ao longo de um ano (em manobra e em *stand-by*) e contar o número de manobras que este realizou nesse período de tempo. Perante a impossibilidade de se poderem realizar medições ao longo de um ano em cada um dos ascensores instalados, e dessa forma obter dados reais dos consumos, pretende-se estimar o consumo de energia eléctrica anual dos ascensores, a partir de medições que ocorram num espaço temporal limitado. Para tal pesquisou-se sobre métodos e procedimentos que permitam a determinação e avaliação da necessidade energética de ascensores e que possibilitem uma comparabilidade das diferentes soluções oferecidas através de uma identificação fácil, uniforme e normalizada da classe de eficiência energética.

Existem várias tentativas de definição de normas que permitam comparar o consumo energético de ascensores e avaliar a sua eficiência energética:

- + Em 2005 foi introduzida na Suíça a norma SIA 380/4 “Energia eléctrica em edifícios em altura” que descreve, entre outras, as exigências em relação a ascensores³⁹.
- + Em 2009 (Março) foi publicada a VDI 4707:2009 – Parte 1 pela Associação dos Engenheiros Alemães (*Verein Deutscher Ingenieure*). É a base para a avaliação energética e uma classificação em termos energéticos de ascensores. Esta norma utiliza parte da metodologia adoptada na norma SIA 380/4.
- + Em 2010 o grupo de trabalho WG10 do comité técnico ISO/TC178 em colaboração com o comité técnico CEN/TC10 iniciou o desenvolvimento da norma prEN ISO 25745:2010. Trata-se ainda de uma proposta de norma, pelo que não está a ser utilizada pela indústria de ascensores.

Uma vez que a norma VDI 4707:2009 é actualmente a norma mais utilizada pelos principais fabricantes europeus de ascensores, será realizada uma explicação detalhada da mesma.

³⁹ A Suíça foi um dos primeiros países do mundo a incluir exigências em termos de consumo de energia eléctrica em ascensores. A norma SIA 380/4 “Energia eléctrica em edifícios em altura”, baseia-se num estudo de consumo de energia eléctrica de ascensores e o seus potenciais de poupança. Pela primeira vez faz-se referência à importância que assume o consumo de energia eléctrica em *stand-by* em ascensores. Para a norma SIA 380/4 foi desenvolvido um método de cálculo do consumo energético de um ascensor a partir dos valores de consumo de energia eléctrica extremos medidos na manobra à subida e na manobra à descida, ao longo de todo o curso do ascensor.

2.5.3.1 A norma VDI 4707:2009

A VDI 4707:2009 é a base para a avaliação energética e uma classificação em termos energéticos de ascensores. A parte 1, já publicada em Março de 2009, define um procedimento através do qual o ascensor no seu todo, dada uma determinada utilização, é classificado de acordo com o seu consumo energético em *stand-by* e em movimento. A VDI 4707:2009 Parte 1, apresenta explicitamente a forma como se devem obter os dados dos consumos energéticos através de medições. Problemático para os fabricantes é o facto de a eficácia desses dados só poder ser verificada após a entrada em funcionamento do ascensor.

Os objectivos da norma

1. Permitir uma avaliação e classificação universal e transparente da eficiência energética de ascensores, baseada em métodos de cálculo e teste dos seus consumos energéticos;
2. Disponibilizar a construtores civis, arquitectos, projectistas, empresas instaladoras e de manutenção de ascensores e a operadores um enquadramento que lhes permita incluir a procura de energia de ascensores na sua avaliação da eficiência energética do edifício e assim seleccionar os equipamentos mais adequados;
3. Servir de base para um *rating* energético de ascensores no âmbito da eficiência energética total do edifício, dando origem à elaboração de um certificado energético.

O âmbito da norma

A Norma VDI 4707:2009 aplica-se à avaliação e classificação de novos ascensores de pessoas e de cargas, quanto à sua eficiência energética. Pode igualmente ser utilizada para a:

- a. determinação da eficiência energética de ascensores já instalados;
- b. comprovação dos parâmetros fornecidos pelos fabricantes de ascensores;
- c. determinação do consumo energético estimado.

Os valores característicos

A necessidade energética, isto é, o valor esperado de consumo de energia, calculado com base em determinadas premissas, pode ser caracterizada com base na:

1. Necessidade energética de *stand-by* e
2. Necessidade energética de manobra.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

A necessidade energética de *stand-by* é a necessidade energética total do ascensor, quando este se encontra em modo *stand-by*, isto é, quando o sistema de tracção se encontra desligado. Só serão considerados as partes do equipamento eléctrico e os componentes que contribuem para a prontidão de reacção e de funcionamento do ascensor (por exemplo, a iluminação da casa de máquinas e da caixa do ascensor não são consideradas).

A necessidade energética de manobra é a necessidade energética total do ascensor durante a manobra para um ciclo de manobras previamente definido e com uma determinada carga específica.

O valor resultante da necessidade energética específica em mWh/(kg.m) está relacionada com a distância percorrida em metros e com a carga nominal em kg.

Estes valores de necessidade energética específica podem ser utilizados para comparar a eficiência energética de diferentes ascensores.

Dependendo dos valores de necessidade energética, os ascensores são divididos em classes de necessidade energética de *stand-by* e de manobra.

Estes dois valores de necessidade energética determinam a classe de eficiência energética do ascensor, dependendo da sua intensidade de utilização.

Existem sete classes de necessidade energética e de eficiência energética, representadas pelas letras A a G. A classe A representa a menor necessidade energética, e logo a melhor eficiência energética.

A necessidade energética global de um ascensor depende, para além da sua concepção, especialmente da sua utilização. Dependente do tipo de edifício, da utilização do ascensor e do número de passageiros, são definidas 5 categorias de utilização que diferem entre si devido ao tempo médio de manobra diário. Dependendo da parcela temporal entre a necessidade energética de *stand-by* e de manobra, podem ser calculadas várias classes de eficiência energética para as 5 categorias de utilização.

Na tabela seguinte são apresentadas as 5 categorias de utilização, os tempos médios de manobra e de *stand-by*, bem como exemplos de ascensores que se enquadram nessas categorias:

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 1: Categorias de Utilização

Categoria de Utilização	1	2	3	4	5
Intensidade de Utilização	muito baixa	baixa	média	elevada	muito elevada
Frequência de Utilização	muito rara	rara	pontualmente	elevada	muito elevada
Tempo médio de manobra (horas / por dia)	0,2 ($\leq 0,3$)	0,5 ($>0,3-1$)	1,5 ($>1-2$)	3 ($>2-4,5$)	6 ($>4,5$)
Tempo médio de stand-by (horas / por dia)	23,8	23,5	22,5	21	18
Tipo de Edifício e de utilização	Edifício de habitação com até 6 apartamentos	Edifício de habitação com até 20 apartamentos	Edifício de habitação com até 50 apartamentos	Edifício de habitação com mais de 50 apartamentos	
	Pequeno edifício de escritórios e de serviços com pouco movimento	Pequeno edifício de escritórios e de serviços com 2 a 5 pisos	Edifício de escritórios e de serviços com até 10 pisos	Edifício de escritórios e de serviços em altura com mais de 10 pisos	Edifício de escritórios e de serviços em altura com mais de 100m
		Pequeno Hotel	Hotel de dimensão média	Grande Hotel	
				Hospital de pequena ou média dimensão	Grande hospital
		Ascensor de carga com pouco movimento	Ascensor de carga com movimento médio	Ascensor de carga integrado no processo produtivo, com 1 turno	Ascensor de carga integrado no processo produtivo, com vários turnos

Fonte: VDI 4707:2009

Determinação das especificações e dos valores característicos

As necessidades energéticas de *stand-by* podem ser determinadas por medição ou pela soma dos valores de necessidades energéticas individuais, desde que suficientemente conhecidos. São determinadas 5 minutos após a conclusão da última manobra.

As necessidades energéticas de manobra são determinadas para manobras de referência utilizando-se cargas individuais com referência à carga nominal de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 2: Espectro de Cargas

Carga em % da carga nominal	% de manobras
0%	50%
25%	30%
50%	10%
75%	10%
100%	0%

Fonte: VDI 4707:2009

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

As manobras de referência são constituídas pelo seguinte ciclo de manobra:

1. Início da manobra de referência com a porta do ascensor aberta;
2. Fechar a porta do ascensor;
3. Viagem para cima ou para baixo utilizando todo o curso do ascensor;
4. Abrir e fechar imediatamente a porta do ascensor;
5. Viagem para baixo ou para cima utilizando todo o curso do ascensor;
6. Abrir a porta;
7. Fim da manobra de referência.

As manobras de referência são somadas de acordo com o rácio temporal indicado na tabela 2.

Alternativamente, para ascensores com uma massa de contrapeso igual ao peso da cabina mais 40% ou 50% da carga nominal, ou para ascensores com uma massa de compensação inferior a 30% do peso da cabina ou para ascensores sem qualquer compensação, as manobras de referência podem ser realizadas com uma cabina vazia. Para corrigir os valores em relação ao espectro de cargas apresentados na tabela 2, as necessidades energéticas de manobra determinadas com a cabina vazia são multiplicados pelos seguintes **factores de carga**⁴⁰:

- 0,7 para ascensores com contrapeso (peso da cabina mais 40% ou 50% da carga nominal);
- 1,2 para ascensores sem qualquer compensação ou com uma compensação até 30% do peso da cabina;

As necessidades energéticas de manobra determinadas nas manobras de referência são divididas pela carga nominal da cabina e pela distância percorrida durante a manobra de referência.

As medições dos valores de consumo de energia devem ser feitas a seguir ao interruptor principal do circuito de potência e a seguir ao interruptor para os circuitos de iluminação.

As medições devem ocorrer em condições reais de funcionamento do ascensor, não se podendo desligar quaisquer cargas, que normalmente estejam activas durante o normal funcionamento do ascensor.

⁴⁰ Nota: o factor de carga não é utilizado quando as necessidades energéticas de manobra são determinadas tomando por base o espectro de cargas indicado na tabela 2.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Necessidades energéticas e classes de eficiência energética

O ascensor é atribuído a uma classe de necessidade energética tomando por base as tabelas 3 e 4, e de acordo com as necessidades energéticas de *stand-by* e de manobra.

As classes de eficiência energética para um ascensor são determinadas a partir dos valores de consumo de energia em *stand-by* e em manobra, projectando a potência em *stand-by* e a necessidade energética em manobra com os tempos médios de *stand-by* e viagem para a obtenção do consumo diário, de acordo com a tabela 2 e dividindo o valor obtido pelo número de metros percorridos e pela carga nominal. Obtém-se assim a energia necessária total específica para o ascensor.

Para a atribuição das necessidades específicas de energia a classes de eficiência energética, os valores limite para a manobra e para as necessidades de *stand-by* pertencentes a uma mesma classe são combinados de acordo com as tabelas 3 e 4 utilizando-se a seguinte equação:

$$E_{Ascensor,max} = E_{manobra,max} + \frac{P_{s\ tan\ d-by,max} \times t_{s\ tan\ d-by} \times 1000}{Q \times v_{no\ min\ al} \times t_{manobra} \times 3600}$$

$P_{stand-by}$ deverá ser indicado em mW e $t_{manobra}$ em h.

Tabela 3: Classes de necessidades energéticas – *stand-by*

Classes de necessidades energéticas - stand-by							
Potência / Output (W)	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	≤ 1600	> 1600
Classe	A	B	C	D	E	F	G

Fonte: VDI 4707:2009

Tabela 4: Classes de eficiência energética - manobra

Classes de eficiência energética - Manobra							
Consumo energético específico (mWh/(kg.m))	≤ 0,56	≤ 0,84	≤ 1,26	≤ 1,89	≤ 2,80	≤ 4,20	> 4,20
Classe	A	B	C	D	E	F	G

Fonte: VDI 4707:2009

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Certificado

Os valores característicos poderão ser finalmente apresentados num certificado energético.

Mediante o recurso a esta norma, é possível, a partir da medição de uma manobra de referência e da categoria de utilização, estimar o consumo anual de energia eléctrica de um ascensor em movimento.

Conclusões:

Neste capítulo foi estudado o estado da arte na indústria de ascensores relativamente a:

1. ascensores eléctricos de roda de aderência, tendo-se analisado os tipos de sistemas de tracção eléctricos mais utilizados;
2. conversores electrónicos de frequência utilizados, pois apenas a instalação de um sistema desta natureza permitirá a utilização da energia recuperada;
3. sistemas de armazenamento de energia eléctrica, tendo sido analisadas especificamente as baterias e os supercondensadores;
4. normas sobre a eficiência energética nos ascensores, a partir das quais se pretende obter previsões do consumo e da recuperação anual de energia eléctrica para um dado ascensor.

A partir deste estudo será possível identificar possíveis hipóteses de utilização da energia recuperada em ascensores eléctricos de roda de aderência já instalados.

3. Metodologia utilizada e caracterização do objecto de estudo

3.1 Metodologia utilizada

Para o desenvolvimento da presente tese foi adoptada a seguinte metodologia:

1. Recolha de informação sobre os seguintes temas:
 - a. Sistemas de tracção para ascensores eléctricos com roda de aderência e os diferentes tipos de máquinas e de motores utilizados na indústria de ascensores;
 - b. Conversores electrónicos de frequência;
 - c. Sistemas de armazenamento de energia (eléctrica);
 - d. Eficiência energética aplicada aos ascensores, nomeadamente o fenómeno da recuperação de energia, a sua modelação física e normas sobre a eficiência energética para ascensores.

2. Realização de medições em ascensores instalados, da carteira de manutenção da Schmitt-Elevadores, Lda através de amostragem estatística⁴¹:
 - a. Definição da população
 - i. Procedeu-se ao levantamento do número total de ascensores instalados pela Schmitt+Sohn Elevadores em Portugal (critério do fabricante).
 - ii. Por questões de racionalidade económica foram seleccionados todos os ascensores eléctricos de roda de aderência instalados na região do grande Porto (critério geográfico).
 - iii. Em seguida, deste total, foram contados todos os ascensores eléctricos de roda de aderência dotados de conversor electrónico de frequência (apenas estes permitem realizar a recuperação da energia gerada), tendo-se obtido 210 ascensores nesta situação.
 - iv. Recorrendo às categorias de utilização definidas pela norma VDI 4707:2009, os ascensores eléctricos de roda de aderência dotados de conversor electrónico de frequência foram subdivididos pelas cinco categorias de utilização (ver tabela 1), tendo-se obtido os seguintes valores:

⁴¹ Processo de recolha de uma parte (amostra), geralmente pequena, dos elementos que constituem um dado conjunto (a população). Da análise dessa parte pretende-se obter informações para todo o conjunto.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 5: Dimensão da população por categoria de utilização

Categoria de utilização	Dimensão da população
Categoria 1	5
Categoria 2	97
Categoria 3	46
Categoria 4	50
Categoria 5	12
Total	210

Fonte: Autor

- b. Construção de amostras representativas de ascensores já instalados: uma amostra por cada categoria de utilização.
 - i. De acordo com o método de amostragem adoptado, foi definido o número de ascensores a medir para cada categoria:

Tabela 6: Dimensão da amostra por categoria de utilização

Categoria de utilização	Dimensão da amostra
Categoria 1	5
Categoria 2	16
Categoria 3	8
Categoria 4	8
Categoria 5	2

Fonte: Autor

- ii. Para a obtenção da amostra aleatória foi atribuído um número a cada elemento da população. Esses números foram em seguida anotados em pequenos pedaços de papel e colocados numa urna. Depois foram extraídos da urna, tendo-se tido o cuidado de misturar bem os papéis antes de cada extracção.
 - iii. Foi elaborada uma lista com os ascensores para cada amostra.
- c. Realização de medições em cada um dos ascensores das amostras
 - i. Definição do plano de execução das medições: Dado que a empresa Schmitt-Elevadores, Lda tem ascensores distribuídos geograficamente, estas intervenções tiveram de ser muito bem

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

planeadas, devido às deslocações envolvidas. Por uma questão de racionalidade económica optou-se apenas por considerar ascensores instalados na área de intervenção da delegação do Porto. Acresceu ainda a necessidade de combinar esta intervenção com o técnico de manutenção responsável pelo ascensor, para que este, caso fosse necessário, pudesse pedir as necessárias autorizações junto do proprietário do ascensor.

- ii. Foi realizada a medição do consumo energético numa viagem com a cabina em vazio, em sentido descendente e ascendente, vencendo todo o curso, isto é, a cabina tinha de ser movimentada entre os pisos extremos do edifício. A medição foi executada de acordo com o seguinte procedimento de trabalho:
 - a. Ligar o analisador de potência de acordo com o esquema de montagem específico;
 - b. Colocar o ascensor no piso superior, com a cabina vazia (sem qualquer carga);
 - c. Iniciar o processo de gravação de dados;
 - d. Abrir a porta de cabina;
 - e. Fechar a porta de cabina;
 - f. Viagem descendente até ao piso inferior (viagem ao longo de todo o curso);
 - g. Abrir a porta de cabina;
 - h. Fechar a porta de cabina;
 - i. Viagem ascendente até ao piso superior (viagem ao longo de todo o curso);
 - j. Abrir a porta de cabina;
 - k. Fechar a porta de cabina;
 - l. Parar a gravação de dados;
 - m. Registrar os dados obtidos.
- iii. Recolha dos dados: Medição da energia eléctrica dos ascensores em modo motor e em modo gerador no barramento DC do conversor, com base na própria ferramenta de medição do conversor de

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

frequência CT com um *software* próprio⁴², para uma viagem completa. Os dados recolhidos foram depois descarregados através do interface próprio para o computador, numa folha de cálculo especificamente concebida para a análise dos dados.

3. Análise dos dados recolhidos:

Os dados medidos foram transferidos para uma tabela de *Microsoft Excel*, juntamente com os dados temporais associados. A energia foi calculada a partir do integral numérico dos valores de potência obtidos do gráfico obtido pelo analisador de potência, de acordo com a seguinte equação:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P * dt$$

Para a determinação do consumo anual de energia a partir dos dados obtidos, foi utilizada a norma alemã VDI 4707:2009⁴³.

4. Construção de cinco hipóteses de trabalho

- a. Hipótese 1: Carregamento de bateria: alimentação dos circuitos em *stand-by*;
- b. Hipótese 2: Carregamento de condensador: alimentação dos circuitos em *stand-by* e alimentação do barramento DC;
- c. Hipótese 3: Reinjecção no barramento DC do grupo de ascensores;
- d. Hipótese 4: Reinjecção na rede do edifício;
- e. Hipótese 5: Reinjecção na rede pública.

Para cada uma das hipóteses de trabalho calculou-se a energia recuperável bem como os indicadores económico-financeiros do investimento.

5. Construção de um simulador em *Microsoft Excel* que permitisse, para um dado ascensor instalado, definir qual a solução de recuperação que se devia aplicar, quer do ponto de vista técnico quer económico. Este simulador foi construído com base na modelação física da recuperação de energia (ver anexo 3) e validado previamente com base nas medições realizadas anteriormente e com base no modelo desenvolvido em *Matlab-Simulink*. Este modelo é apresentado detalhadamente no anexo 4.

⁴² O LiftSP, que é uma ferramenta para PC e que possui um osciloscópio incorporado bem como uma ferramenta para parametrizar o conversor. Este *software* permite visionar todos os parâmetros do conversor Unidrive SP, desde os perfis de velocidade, às correntes do motor e aos sinais de controlo.

⁴³ Para uma descrição mais detalhada consultar o ponto 2.5.3.1.

Equipamento e meios a utilizar para a realização das medições

I. Medições nos ascensores definidos para a amostra. Para a realização das medições foram utilizados os seguintes meios e equipamentos:

1. Plano com os ascensores a medir;
2. Procedimento de medições, com os respectivos esquemas de montagem, bem como uma cópia do projecto de instalação do ascensor⁴⁴;
3. Formulário de recolha de dados sobre o(s) ascensor(es) a estudar (ver formulário desenvolvido para o efeito no anexo 1);
4. Por forma a que seja possível medir a energia que circula no barramento DC, utilizou-se o *software* que a CT disponibiliza (o *LiftSP*, que é uma ferramenta para PC e que possui um osciloscópio incorporado bem como uma ferramenta para parametrizar o conversor. Este *software* permite visionar todos os parâmetros do conversor Unidrive SP, desde os perfis de velocidade, às correntes do motor e aos sinais de controlo. Os parâmetros podem ser monitorizados, alterados e gravados num ficheiro).
5. Analisador de potência trifásico *Chauvin Arnoux CA8334B*, com pinças para uma fácil recolha das medições a realizar. N^o Série: 136796 FDH;
6. *Software Chauvin Arnoux Dataviewer Professional Version 2.00.05*.
Este *software* foi usado para o cálculo da energia consumida e para elaboração dos gráficos relacionados com as medições de potências nos diferentes ascensores;
7. Multímetro *Kaise My 64*, N^o Série 112100257;

II. Medições em ascensores seleccionados como exemplos de instalação. Para a realização das medições foram utilizados os seguintes meios e equipamentos:

1. Plano com os ascensores a medir;
2. Procedimento de medições, com os respectivos esquemas de montagem, bem como uma cópia do projecto de instalação do ascensor⁴⁵;
3. *Power & Energy Logger Chauvin Arnoux PEL 103*, com pinças para uma fácil recolha das medições a realizar. Foi seleccionado este *logger*, pois permite medir os consumos energéticos ao longo de um período de tempo mais alargado (mais de 7 dias, 24 horas). N^o Série: 101235 LAH;

⁴⁴ Para cada ascensor foi elaborado ainda numa fase anterior à sua instalação um projecto de instalação que contém os dados construtivos mais importantes de um ascensor, como por exemplo a sua carga nominal, o número de pisos servidos, a sua velocidade, o curso que tem de vencer, dimensões da caixa, as dimensões da casa de máquinas, quando aplicável, etc.

⁴⁵ Para cada ascensor foi elaborado ainda numa fase anterior à sua instalação um projecto de instalação que contém os dados construtivos mais importantes de um ascensor, como por exemplo a sua carga nominal, o número de pisos servidos, a sua velocidade, o curso que tem de vencer, dimensões da caixa, as dimensões da casa de máquinas, quando aplicável, etc.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

4. *Software Chauvin Arnoux PEL Transfer Version 1.1.0.* Este software foi usado para o cálculo da energia consumida e para elaboração dos gráficos relacionados com as medições de potências nos diferentes ascensores.

3.2 Caracterização do objecto de estudo

Na realização de qualquer estudo quase nunca é possível examinar todos os elementos da população. Procurar-se-á por isso trabalhar com uma amostra da população. A inferência estatística permitirá obter elementos que permitem generalizar, de forma segura, as conclusões obtidas para a amostra da população. Para que as inferências sejam correctas é necessário garantir que a amostra seja representativa da população, isto é, a amostra deve possuir as mesmas características básicas da população relativamente ao fenómeno em estudo.

Definida a população ter-se-á de decidir sobre o método de amostragem, isto é, qual o processo a adoptar na recolha dos elementos a incluir na amostra.

Os métodos de amostragem podem ser classificados em:

1. Métodos não aleatórios ou dirigidos: a construção da amostra é feita a partir de informação obtida à *priori* sobre a população estudada, tentando que a amostra seja um espelho fiel da população. Por assentarem em bases empíricas, tais métodos não permitem calcular a precisão das estimativas obtidas a partir da amostra.
2. Métodos aleatórios ou probabilísticos: quando cada elemento da população tem uma probabilidade conhecida de fazer parte da amostra. Estes métodos possibilitam a determinação da distribuição de probabilidade e permitem quantificar o erro de amostragem decorrente da utilização de apenas uma parte da população.

Uma amostra estratificada é obtida separando-se os elementos da população em grupos não sobrepostos, chamados estratos. Para cada estrato é seleccionada uma amostra aleatória simples. As amostras podem ser de igual dimensão ou proporcionais.

Dado que as medições em todos os ascensores da população se revelaria um processo muito dispendioso e muito demorado, optou-se por realizá-las apenas a uma amostra representativa. Assim, e para o presente caso optou-se por adoptar o método de

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

amostragem probabilística estratificada, tendo-se definido uma taxa de proporcionalidade de 17%⁴⁶.

No anexo 2 apresenta-se a análise estatística detalhada dos dados obtidos através das medições realizadas à amostra de 39 ascensores.

Em função das amostras representativas para cada categoria de utilização de acordo com a norma VDI 4707:2009 que foram obtidas, procedeu-se às medições dos consumos de todos os ascensores que integram a amostra.

Os ascensores da carteira de manutenção da Schmitt-Elevadores, Lda. foram subdivididos em ascensores eléctricos com roda de aderência (apenas estes são objecto de estudo na presente tese) e em ascensores hidráulicos.

Por sua vez, os ascensores eléctricos com roda de aderência foram separados em duas categorias:

1. ascensores sem conversor electrónico de frequência
2. ascensores com conversor electrónico de frequência: apenas este tipo permite realizar a medição da energia recuperada.

Todos os ascensores eléctricos com roda de aderência da carteira de manutenção da Schmitt-Elevadores, Lda. são equipados com um dos seguintes tipos de máquinas:

- a. Máquina com redutor com motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo de 1 velocidade, ou
- b. Máquina com redutor com motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo de 2 velocidades, ou
- c. Máquina com redutor com motor assíncrono de rotor em gaiola de esquilo controlado por conversor de frequência, ou
- d. Máquina sem redutor com motor síncrono de ímanes permanentes controlado por conversor de frequência.

Os dados obtidos, depois de processados deram origem à seguinte tabela, de acordo com a metodologia descrita no ponto 3.1:

⁴⁶ Para grandes valores da amostra (com mais de 30 elementos) a distribuição amostral da média é aproximadamente normal, independentemente da população e desde que esta tenha média e variância finita e o tamanho da população seja pelo menos o dobro da amostra – Teorema do limite central (Spiegel, 2000).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 7 – Dados obtidos a partir das medições realizadas nos ascensores da amostra

Pos.	Número Ascensor	Data Instalação	Carga Nominal [kg]	Peso da cabina [kg]	Peso do contrapeso [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Número de Pisos	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Tecnologia de Tracção (3)	Factor de Carga	Arquitectura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Tempo de Manobra [s]	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Taxa de Recuperação de energia	Grau de recuperação de energia	Consumo energético específico [mWh/(kg.m)]	Energia Anual modo motor [kWh]	Energia Anual modo gerador [kWh]
1	VN105003	2005	800	1600	2000	2,5	72	21	2	4	1	0,7	3	4	108	0,1430	0,0740	52%	34%	0,869	3653,7	1890,7
2	E10253	2008	450	665	890	1,0	15	6	1	1	1	0,7	5	4	68	0,0170	0,0060	35%	26%	0,881	46,0	16,2
3	E12940	2009	450	636	1061	1,0	12	5	1	1	1	0,7	4	3	73	0,0230	0,0010	4%	4%	1,491	58,0	2,5
4	VA197004	2004	630	800	915	1,0	42	15	2	4	1	0,7	1	3	124	0,0600	0,0110	19%	15%	0,794	1335,2	244,8
5	VN100000	2010	630	700	1015	1,0	4	2	2	1	1	0,7	5	4	46	0,0066	0,0009	14%	12%	0,917	26,4	3,7
6	VN100120	2001	750	1400	1775	1,6	42	15	1	3	1	0,7	1	3	93	0,0959	0,0387	40%	29%	1,066	1422,7	574,1
7	VN100121	2001	450	1000	1225	1,6	42	15	1	3	1	0,7	1	3	97	0,0290	0,0012	4%	4%	0,537	412,5	17,1
8	E11477	2009	1600	1700	2500	1,6	40	11	3	5	1	0,7	1	3	111	0,1227	0,0488	40%	28%	0,671	6100,5	2424,8
9	E11478	2009	1600	1700	2500	1,6	40	11	3	5	1	0,7	1	3	107	0,1230	0,0489	40%	28%	0,673	6344,0	2522,1
10	E10458	2007	1600	1450	2250	1,0	12	4	3	4	1	0,7	5	4	66	0,0539	0,0162	30%	23%	0,963	2253,5	678,1
11	E12727	2009	1000	960	1460	1,0	24	7	3	4	1	0,7	1	3	90	0,0880	0,0170	19%	16%	1,283	2698,1	521,2
12	E12730	2009	1600	1312	2112	1,0	28	8	3	4	1	0,7	1	3	112	0,1235	0,0280	23%	18%	0,965	3042,7	689,6
13	E12734	2009	450	597	822	1,0	8	3	3	4	1	0,7	1	3	72	0,0159	0,0051	32%	24%	1,544	608,6	195,5
14	E11823	2010	450	892	1117	1,0	30	11	1	3	1	0,7	5	4	96	0,0505	0,0110	23%	18%	1,309	725,8	158,1
15	E10764	2007	450	726	951	1,0	15	6	1	2	1	0,7	5	4	64	0,0177	0,0065	37%	27%	0,915	126,8	46,6
16	E10769	2008	450	703	928	1,0	15	6	1	2	1	0,7	5	4	74	0,0255	0,0054	21%	17%	1,322	158,4	33,6
17	VN199110	2000	450	1000	1225	1,6	45	16	1	3	1	0,7	1	3	103	0,0537	0,0128	24%	19%	0,928	719,3	172,0
18	VN199111	2000	800	1280	1680	1,0	45	16	1	3	1	0,7	1	3	139	0,0761	0,0159	21%	17%	0,740	755,4	157,8
19	E11341	2008	630	705	1020	1,0	18	7	7	2	1	0,7	5	4	72	0,0362	0,0110	30%	23%	1,118	231,4	70,3
20	E17222	2012	320	500	660	0,6	12	5	1	2	1	0,7	1	3	74	0,0164	0,0014	9%	8%	1,492	101,7	8,7
21	VN103037	2003	320	660	820	1,0	12	5	1	2	1	0,7	1	3	73	0,0176	0,0025	14%	13%	1,604	110,9	16,0
22	E13607	2010	630	726	1041	1,0	21	8	7	3	1	0,7	5	4	99	0,0456	0,0144	32%	24%	1,206	635,5	200,7
23	E13608	2010	630	726	1041	1,0	21	8	7	3	1	0,7	5	4	99	0,0344	0,0116	34%	25%	0,910	479,4	161,7
24	VN1-45P1	2011	450	500	725	1,0	30	11	2	4	1	0,7	1	3	123	0,0397	0,0095	24%	19%	1,029	890,6	213,1
25	VN1-45P4	2011	300	400	550	1,0	27	10	2	4	1	0,7	1	3	87	0,0234	0,0023	10%	9%	1,011	742,2	74,1
26	E14306	2010	630	644	959	1,0	6	3	7	1	1	0,7	5	4	50	0,0130	0,0034	26%	21%	1,21	47,9	12,6
27	E17048	2011	630	700	1015	1,0	3	2	2	1	1	0,7	5	4	45	0,0131	0,0014	11%	10%	2,42	53,5	5,8
28	VN107014	2007	450	665	890	1,0	18	7	1	2	1	0,7	5	4	77	0,0258	0,0092	36%	26%	1,12	154,2	54,8
29	VN107012	2007	450	665	890	1,0	18	7	1	2	1	0,7	5	4	72	0,0283	0,0089	31%	24%	1,22	180,8	56,8
30	VN107016	2007	450	665	890	1,0	18	7	1	2	1	0,7	5	4	76	0,0257	0,0089	34%	26%	1,11	155,8	53,7
31	E14061	2010	450	599	824	1,0	24	9	1	2	1	0,7	5	4	79	0,0262	0,0093	36%	26%	0,85	152,3	54,1
32	E16902	2012	630	700	1015	1,0	24	9	1	2	1	0,7	5	4	87	0,0417	0,0127	31%	23%	0,96	220,2	67,1
33	E16907	2012	450	650	875	1,0	24	9	1	2	1	0,7	5	4	81	0,0225	0,0080	36%	26%	0,73	127,5	45,4
34	E13949	2009	630	800	1115	1,0	12	5	2	2	1	0,7	5	4	59	0,0247	0,0077	31%	24%	1,14	192,7	60,1
35	E10679	2007	1000	960	1460	1,0	3	2	4	2	1	0,7	5	4	41	0,0096	0,0019	19%	16%	1,12	107,5	20,9
36	E15958	2011	630	800	1115	1,0	27	9	2	3	1	0,7	5	4	113	0,0712	0,0158	22%	18%	1,46	868,8	193,0
37	E12110	2008	1000	1000	1500	1,0	24	9	7	2	1	0,7	5	4	77	0,0106	0,0022	20%	17%	0,15	63,5	12,9
38	VN106072	2007	630	733	1048	1,0	15	6	1	2	1	0,7	5	4	72	0,0226	0,0069	31%	24%	0,84	144,0	44,3
39	VN106073	2007	1600	1450	2250	1,0	12	5	7	2	1	0,7	5	4	104	0,0574	0,0152	26%	21%	1,05	253,8	67,1

Legenda:

(1) - Tipo de Edifício:

- 1 - Habitação
- 2 - Escritórios
- 3 - Hospital
- 4 - Shopping
- 5 - Transporte
- 6 - Indústria
- 7 - Outros

(2) -Categoria de Utilização:

- 1 - Muito baixa
- 2 - Baixa
- 3 - Média
- 4 - Elevada
- 5 - Muito elevada

(3) -Tecnologia de Tracção:

- 1 - Ascensor eléctrico
- 2 - Ascensor hidráulico

(4) -Arquitectura Sistema:

- 1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa central
- 2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral
- 3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1, indirecta
- 4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral
- 5 - Sem casa de máquinas, suspensão central
- 6 - Pistão central
- 7 - Sistema hidrocabo
- 8 -Outros

(5) - Tipo de máquina:

- 1 - Máquina com redutor com motor assíncrono de 1 velocidade
- 2 - Máquina com redutor com motor assíncrono de 2 velocidades
- 3 - Máquina com redutor com motor assíncrono e VVVF
- 4 - Máquina sem redutor com motor síncrono de ímanes permanentes e VVVF
- 5 - Válvulas hidráulicas controladas
- 6 - Válvulas hidráulicas reguladas
- 7 - Outros

4. Identificação de hipóteses de utilização da energia recuperada

Para a realização da identificação de hipóteses de utilização da energia recuperada, recorrer-se-á a ascensores que já estão equipados com um conversor electrónico de frequência⁴⁷. Como se viu anteriormente, se o ascensor não estiver equipado com um conversor, a energia recuperada será dissipada no próprio motor, pelo que a energia não poderá ser reutilizada.

Pretende-se estudar detalhadamente diferentes hipóteses para o aproveitamento da energia recuperada (que resulta da operação em modo gerador da máquina de tracção).

O que acontece com a energia produzida quando a máquina opera em modo gerador?

1. Normalmente é convertida em energia calorífica através de resistências de frenagem e dissipada para dentro das casas de máquinas. Frequentemente é ainda necessário proceder à instalação de sistemas de climatização específicos nas casas de máquinas para eliminar essa energia calorífica, o que constitui um consumo adicional de energia eléctrica (ou seja, ocorre uma ineficiência energética).
2. Poder-se-ia eventualmente integrar as resistências de travagem no sistema de águas quentes sanitárias ou no sistema de aquecimento do edifício e dessa forma aproveitar a energia dissipada⁴⁸.
3. Reinjecção de energia na rede eléctrica do edifício: Na maior parte dos casos, existem outros equipamentos ligados à rede de distribuição eléctrica do edifício (iluminação, ventilação, etc.) que podem consumir a energia gerada pelos ascensores.
4. Mas a energia recuperada pode ser utilizada ainda para:
 - a. alimentar a máquina do ascensor que esteja a funcionar em modo motor, ou
 - b. cobrir as necessidades de energia eléctrica do ascensor quando este se encontra em modo *stand-by*.

Na presente tese pretende-se analisar em mais detalhe as opções descritas nos pontos 3. e 4., desenvolvendo hipóteses de trabalho para a utilização da energia recuperada.

⁴⁷ Para os novos ascensores propõe-se a instalação de raiz de um conversor electrónico de frequência regenerativo. Desta forma conseguir-se-á beneficiar da utilização da energia recuperada através da reinjecção na rede do edifício. Para os ascensores instalados, mas sem conversor de frequência propõe-se a instalação de um sistema *Liftcomfort* - que foi lançado pela empresa Schmitt+Sohn Elevadores, Lda em 2009. Trata-se de um quadro autónomo com um conversor de frequência, que pode ser interligado ao quadro de comando do ascensor e à máquina de uma ou duas velocidades existente.

⁴⁸ É uma solução que pode contribuir para a melhoria da eficiência energética nos ascensores, e que poderá ser estudada no futuro, mas que excede o âmbito da presente tese.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Por forma a melhor compreender o estudo e a avaliação de cada uma das hipóteses de trabalho apresentadas em seguida, convém relembrar o impacto que o consumo de um ascensor apresenta quando se encontra em modo *stand-by*.

Num estudo realizado por Franco e Ferreira (2009) verificou-se por medições realizadas a uma amostra de ascensores da carteira de manutenção da Schmitt-Elevadores, Lda que o consumo de um ascensor em *stand-by* pode variar entre 12% (edifícios da categoria de utilização 4, segundo a norma VDI4707:2009) e 65% (edifícios da categoria de utilização 1, segundo a norma VDI4707:2009) do consumo total anual de energia, em função da categoria de utilização do mesmo.

Almeida et al. (2010) realizou no âmbito do projecto E4 –Energy Efficient Elevators & Escalators igualmente um estudo em que se procurou estimar o consumo em funcionamento e em *stand-by* dos ascensores em Portugal. Foram obtidos os seguintes dados relativos ao consumo em *stand-by* em percentagem do consumo anual total: para o tipo de edifício residencial 72%; para o tipo de edifício de escritórios: 30%; para o tipo de edifício hospital: 19%; para o tipo de edifício hotel: 17%; para o tipo de edifício comercial: 38% e para os outros tipos de edifícios: 52%.

Recorrendo à norma VDI4707:2009 percebe-se que o elevado consumo em *stand-by* influencia decisivamente a categoria de eficiência energética do ascensor. Tudo o que se possa fazer para reduzir este consumo em *stand-by* permitirá aumentar a classe de eficiência energética do ascensor como um todo.

Mesmo com todos os esforços de optimização que se possam fazer, o ascensor terá sempre um consumo mínimo em *stand-by* que nunca será possível eliminar, a não ser que se desligue por completo o ascensor (esta última situação implicaria um rearranque lento do sistema e por conseguinte uma não disponibilidade imediata do ascensor)⁴⁹.

O recurso à energia eléctrica recuperada do sistema e armazenada em baterias ou em condensadores poderá reduzir ainda mais o consumo em *stand-by* melhorando a classificação de eficiência energética do ascensor, que será tanto mais relevante quanto menor for a frequência de utilização do ascensor.

Nos subcapítulos seguintes analisar-se-ão as diferentes hipóteses de trabalho de utilização da energia recuperada nas dimensões técnica e económico-financeira.

⁴⁹ O que poderá ser naturalmente também uma estratégia para melhorar a eficiência energética nos ascensores. Esta hipótese de trabalho não faz parte do âmbito de estudo desta tese.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Na vertente técnica, pretende avaliar-se a exequibilidade, as vantagens e as desvantagens da implementação de cada solução, bem como a facilidade da sua implementação.

Na vertente de avaliação económico-financeira pretende-se verificar se os benefícios obtidos com o aproveitamento da energia recuperada ao longo de um dado período de tempo permitem cobrir os gastos com o investimento que se têm de incorrer para se poder utilizar essa energia recuperada.

“Para a avaliação da rentabilidade de um projecto de investimento o *cash-flow*⁵⁰ relevante é o *cash-flow* monetário que engloba os *cash-flows* de investimento (associados aos desembolsos com a realização do investimento) e os *cash-flows* de exploração (fluxos desembolsados ou recebidos após o projecto estar a funcionar, associados ao pagamento e ao recebimento dos gastos e rendimentos de exploração. Atendendo ao valor temporal do dinheiro, os fluxos devem ser registados no período de tempo em que ocorrem e posteriormente, para efeito de comparação entre eles, reportados a um período comum” (Lopes, 2011).

O *cash-flow* de exploração de um projecto, para um dado período de tempo, traduz-se na diferença entre os *cash-flows* de entrada relativos ao recebimento dos rendimentos de exploração e os *cash-flows* de saída relativos ao pagamento dos gastos de exploração.

O *cash-flow* de investimento, por sua vez, resulta do pagamento dos custos das diversas rubricas do investimento e do eventual recebimento de valores residuais. No presente estudo, o *cash-flow* de investimento será composto pelo valor do custo dos equipamentos a instalar acrescido do respectivo custo da mão-de-obra. O valor residual será nulo, porquanto os equipamentos não têm qualquer valor de mercado no fim da sua vida útil.

Relativamente ao horizonte temporal, e segundo Lopes (2011), podem considerar-se 3 alternativas: o ciclo de vida do produto (mercado), atender à vida física dos investimentos (vida técnica) ou à vida económica dos investimentos (obsolescência). Para o presente estudo, optar-se-á por considerar a duração da vida física do investimento, definindo-se que a vida técnica de cada investimento será de 10 anos.

Ainda, “os critérios de decisão a utilizar na avaliação e selecção de projectos de investimento devem ser baseados em *cash-flows* descontados, isto é, no confronto dos *cash-flows* investidos com os *cash-flows* gerados pelas operações, tendo em conta o valor temporal do dinheiro” (Lopes, 2011).

⁵⁰ Em sentido literal, *cash-flow* significa fluxo de caixa ou fluxo de tesouraria, podendo ser um fluxo de entrada (*inflow*) ou de saída (*outflow*). *Cash-flow* é tudo aquilo que faz alterar o saldo de disponibilidades (Lopes, 2011).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Serão utilizados os seguintes critérios de avaliação e selecção de projectos de investimento⁵¹:

1. Período de Recuperação Actualizado (PRA): mede o tempo necessário para que os *cash-flows* gerados pelo projecto cubram os *cash-flows* nele investidos. O limite máximo para o período de recuperação de um projecto é estabelecido previamente e o projecto é rejeitado se exceder esse limite. Pode ser utilizado também para fazer o *ranking* de alternativas e ser usado como critério secundário, para desempate entre projectos com o mesmo resultado no critério principal (VAL ou TIR). Contudo, ignora por completo os *cash-flows* após o período de recuperação.
2. Valor Actual Líquido (VAL): comparação do somatório dos *cash-flows* gerados pelo projecto, actualizados à taxa de custo de capital do projecto, com o *cash-flow* dispendido inicialmente (o custo do investimento). Se o somatório dos *cash-flows* gerados for superior ao custo de investimento (VAL positivo), o projecto deve ser aceite. Caso contrário, o projecto deve ser rejeitado. O VAL pode ser entendido como o capital em excesso que o dono do projecto obtém hoje, após repor e remunerar o custo do investimento. Se o VAL for nulo, o projecto tem capacidade para repor o capital investido e para remunerar esse capital à taxa exigida, sem no entanto criar valor para o dono do projecto. O VAL é calculado da seguinte forma:

$$VAL = CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r_c)^t}$$

Com CF_0 = *cash-flow* relativo ao custo de investimento inicial previsto

CF_t = *cash-flow* líquido esperado no período t

n = número de períodos que dura o investimento

r_c = taxa de actualização apropriada ao projecto

3. Taxa Interna de Rentabilidade (TIR): indica a rentabilidade intrínseca do capital investido. Pretende-se encontrar a taxa de actualização que iguala o valor actual dos fluxos de exploração líquidos do projecto, ao valor actual dos custos de investimento (ou seja, a taxa de desconto que força o VAL a zero). A TIR não torna necessária a determinação do custo de capital do projecto para determinar a rentabilidade deste. Para servir de critério de decisão, ter-se-á de comparar a TIR obtida com o custo do seu financiamento. Se o projecto apresentar uma TIR superior ao custo de capital,

⁵¹ Não faz parte desta tese explicar em detalhe as vantagens e desvantagens de cada um dos critérios de avaliação e selecção de projectos. Para tal poderá ser consultado Lopes (2001).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

existirá um excedente e criará valor e logo o projecto deverá ser aceite. Ou seja, a TIR é a taxa máxima a que o investidor poderia financiar o projecto sem perder dinheiro. A TIR é calculada a partir de:

$$\sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

Que custo de capital (taxa de actualização) utilizar no desconto dos *cash-flows*? Normalmente deverá utilizar-se o custo médio ponderado de capital (CMPC) da organização como taxa de actualização. No caso presente, e como em muitas situações o dono do edifício são administrações de condóminos, definiu-se que a taxa de actualização será de 4,49%⁵².

Para a avaliação económico-financeira foram considerados os seguintes pressupostos:

1. Horizonte temporal de análise: 10 anos
2. Taxa de custo de capital (taxa de actualização): 4,49% (ao ano)
3. Custo médio do kWh: 0,1418€/kWh⁵³

4.1 Hipótese 1: Carregamento de bateria

Descrição da solução técnica:

Por forma a evitar que a energia que seja eventualmente recuperada num ascensor seja dissipada na resistência de frenagem, sugere-se a instalação de um sistema que a partir do barramento DC do conversor electrónico de frequência permita carregar uma bateria.

Pretende-se que a bateria alimente todos os circuitos do ascensor quando este estiver em modo *stand-by*. Com esta solução poder-se-á eventualmente melhorar o desempenho do ascensor e obter uma classificação energética superior.

Que cargas têm de ser alimentadas quando o ascensor está em *stand-by*? O próprio comando do ascensor e o conversor electrónico de frequência, pressupondo que as restantes medidas de optimização energética propostas por Franco e Ferreira (2009) já tenham sido implementadas. Tipicamente a potência necessária para um ascensor em modo *stand-by* será de 45 W⁵⁴.

Que dificuldades técnicas podem surgir na implementação desta solução?

⁵² Taxa de juro sobre saldos de instituições financeiras monetárias referente a empréstimos a sociedades não financeiras, mês de Fevereiro, 2013 (Banco de Portugal, 2013).

⁵³ Tarifa de baixa tensão normal até 20,7 kVA. Fonte EDP Serviço Universal consultado em www.edpsu.pt em 28.04.2013.

⁵⁴ Medições realizadas pelo autor nos ascensores da Schmitt+Sohn que integram a amostra. Almeida *et. al.* estimam que o consumo em *stand-by* utilizando as melhores tecnologias disponíveis represente 50 W.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

- Pulsção da corrente DC que circula no barramento DC⁵⁵ do conversor electrónico de frequência.
- Elevada tensão no barramento DC, face à baixa tensão necessária nos circuitos que têm de ser alimentados quando o ascensor está em modo *stand-by*. Tipicamente, em modo gerador, o barramento DC do conversor apresenta tensões entre 580 V e 700 V, enquanto a tensão necessária para alimentar os circuitos do comando do ascensor é de 24 V DC.
- O tempo elevado que leva a carregar por completo uma bateria.
- Devido ao baixo número de manobras, ao baixo curso e à baixa energia potencial em jogo, poderá resultar numa baixa energia recuperada ao longo de cada dia, pelo que a bateria poderá nunca ser completamente carregada, ou seja poderão existir vários pequenos carregamentos ao longo de um dia. Os vários ciclos de carga e descarga podem danificar a bateria.
- Necessidade de um sistema que faça a gestão da carga e da descarga da bateria. A bateria apenas deve descarregar quando o ascensor se encontrar em *stand-by*. Por outro lado, a bateria não deve ser carregada para além da sua capacidade.

Desenvolveu-se um sistema que ultrapassou estes constrangimentos, conforme se pode ver no esquema seguinte:

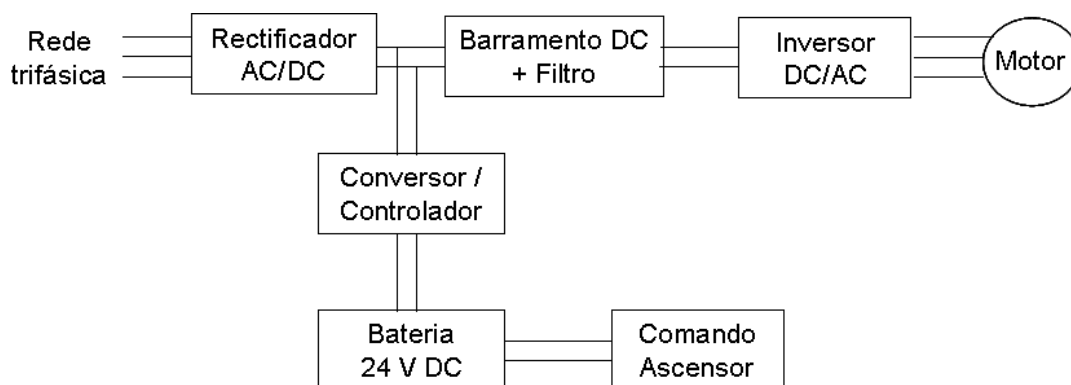


Figura 18 – Carregamento de bateria e alimentação do comando do ascensor em *stand-by*

Fonte: Autor

O sistema é composto por um conversor DC-DC que é interligado com o barramento DC do conversor electrónico de frequência e que através de um carregador apropriado carrega um

⁵⁵ Corrente contínua é a corrente que passa por um condutor ou por um circuito num só sentido (Gussow, 2004). Uma fonte de tensão contínua não muda a polaridade da tensão de saída. Por outro lado, uma tensão de corrente alternada inverte ou alterna periodicamente a polaridade da tensão. A corrente contínua pode ser classificada em corrente contínua constante ou em corrente contínua pulsante.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

conjunto de duas baterias de chumbo-ácido seladas, montadas em série, com uma tensão de 24 V e uma capacidade de 17 Ah.

Optou-se por um conjunto de baterias desta natureza, dado que este tipo de bateria é já hoje utilizado no ascensor para alimentar a iluminação de emergência, bem como o sistema de resgate automático do mesmo. Por outro lado o baixo custo de aquisição foi também um factor determinante na selecção desta bateria para a implementação desta solução.

Quando a tensão no barramento DC ultrapassa os 600 V DC (ou seja, o motor encontra-se em modo gerador) e enquanto se mantiver acima desse valor, o controlador permitirá que a bateria seja carregada através do conversor DC-DC a uma tensão de aproximadamente 30 V.

Sempre que o ascensor se encontre em modo *stand-by*, o comando do ascensor passará a ser alimentado preferencialmente pela bateria, até que a carga da bateria desça abaixo de um determinado nível programado (será realizada uma verificação contínua da carga desta) ou até que o ascensor seja reactivado, isto é, abandone o modo *stand-by*.

Vantagens e desvantagens da solução:

Vantagens:

- + Sistema fácil de instalar: ligação ao barramento DC e ao circuito de alimentação do comando
- + Sistema de baixo custo
- + Não existe reinjecção na rede do edifício, e logo não existe potencial de perturbação na rede eléctrica do edifício.

Desvantagens:

- + A bateria poderá não ser carregada com carga suficiente para poder alimentar as cargas em modo *stand-by*
- + Durabilidade da bateria, perante os ciclos de carga e de descarga da bateria

Custos / investimento:

Por cada módulo a instalar num ascensor o investimento a realizar será de 385 Euros. Este valor foi calculado a partir dos componentes utilizados (Fonte: Schmitt-Elevadores, Lda.)

Avaliação do investimento:

Com base nas medições realizadas, calculou-se para cada um dos ascensores medidos, e aplicando a metodologia definida, a energia recuperada previsual ao longo de um ano. Calculou-se em seguida o consumo energético em *stand-by* que cada um dos ascensores

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

irá previsionalmente necessitar ao longo de um ano. A energia fornecida pela bateria será energia que não será necessário comprar à rede pública, pelo que será esse o benefício que se obterá com esta solução. O *cash-flow* anual será então dado pela energia não comprada à rede multiplicada pelo preço de compra de cada kWh à rede pública.

Com base nos *cash-flows* de exploração calculados e no *cash-flow* de investimento, é calculado o VAL, a TIR e o PRA. Apresentam-se na tabela 8 os resultados obtidos para cada um dos ascensores sujeitos à medição.

Conclusões:

A partir dos dados obtidos com as medições realizadas em todos os ascensores da amostra é possível apresentar as seguintes conclusões:

1. Apesar de ser tecnicamente executável, esta solução não é viável para nenhum dos ascensores estudados, atendendo ao estudo económico-financeiro realizado. Na análise realizada não se teve em conta a baixa durabilidade das baterias e a sua consequente substituição, o que ainda tornaria a avaliação económico-financeira mais desfavorável.
2. Quanto mais elevada a categoria de utilização a que pertence o ascensor, e logo maior o número de viagens realizadas ao longo de um ano, menos desvantajosa se torna a instalação desta solução. Assim, se para um ascensor da categoria de utilização I (muito baixa intensidade de utilização) o período de recuperação actualizado poderá ser de 117 anos, já para um ascensor da categoria V (intensidade de utilização muito elevada) este período de recuperação do investimento será apenas de 18 anos.
3. Esta solução poderá ser aplicada se se pretender melhorar a classe de eficiência energética em *stand-by* do ascensor em causa. Contudo, e ainda assim, será mais relevante introduzir soluções que permitam reduzir o consumo em *stand-by* do ascensor (conforme sugerido por Franco e Ferreira, 2009).
4. Tecnicamente fará sentido aplicar este sistema em situações em que exista apenas um único ascensor no edifício, o que ocorre normalmente e frequentemente em edifícios habitacionais. Para edifícios com dois ou mais ascensores existirão outras soluções em que seja possível recuperar a energia, conforme se irá ver nas hipóteses de trabalho seguintes.
5. Devido às características das baterias (baixa densidade de potência) não fará sentido utilizá-las para alimentar o barramento DC do conversor de frequência com o ascensor em movimento.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 8 – Resultados da Hipótese 1: Carregamento de bateria

Tabela de Medições e de Resultados - Hipótese 1: Carregamento de Bateria																			
Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Número de Pisos	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Arquitectura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Energia diária modo gerador [kWh]	Energia armazenável na bateria diária [kWh]	Energia armazenável na bateria anual [kWh]	Valor poupado anualmente [€]	Valor do investimento [€]	Período de Recuperação Actualizado (PRA) [Anos]	Valor Actual Líquido (VAL) [€]	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) [%]
3	E12940	450	1,0	12	5	1	1	4	3	0,0230	0,0010	0,0067	0,0067	2,4333	0,35	365,00	1116	-362,2684	Não Calc.
2	E10253	450	1,0	15	6	1	1	5	4	0,0170	0,0060	0,0635	0,0635	23,1882	3,29	365,00	117	-359,9695	Não Calc.
27	E17048	630	1,0	3	2	2	1	5	4	0,0131	0,0014	0,0139	0,0139	5,0688	0,72	365,00	536	-379,3099	Não Calc.
5	VN100000	630	1,0	4	2	2	1	5	4	0,0066	0,0009	0,0054	0,0054	1,9710	0,28	365,00	1378	-362,7874	Não Calc.
26	E14306	630	1,0	6	3	7	1	5	4	0,0130	0,0034	0,0536	0,0536	19,5672	2,77	365,00	139	-363,0344	Não Calc.
20	E17222	320	0,6	12	5	1	2	1	3	0,0164	0,0014	0,0271	0,0271	9,8903	1,40	365,00	275	-373,8974	Não Calc.
21	VN103037	320	1,0	12	5	1	2	1	3	0,0176	0,0025	0,0471	0,0471	17,2039	2,44	365,00	158	-365,6873	Não Calc.
15	E10764	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0177	0,0065	0,1051	0,1051	38,3546	5,44	365,00	71	-341,9441	Não Calc.
16	E10769	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0255	0,0054	0,0908	0,0908	33,1570	4,70	365,00	82	-347,7788	Não Calc.
38	VN106072	630	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0226	0,0069	0,1890	0,1890	68,9850	9,78	365,00	39	-307,5591	Não Calc.
28	VN107014	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0258	0,0092	0,1836	0,1836	67,0140	9,50	365,00	41	-309,7717	Não Calc.
29	VN107012	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0283	0,0089	0,1430	0,1430	52,1846	7,40	365,00	52	-326,4189	Não Calc.
30	VN107016	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0257	0,0089	0,2218	0,2218	80,9570	11,48	365,00	34	-294,1197	Não Calc.
31	E14061	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0262	0,0093	0,1744	0,1744	63,6469	9,03	365,00	43	-313,5516	Não Calc.
33	E16907	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0225	0,0080	0,2250	0,2250	82,1250	11,65	365,00	33	-292,8085	Não Calc.
32	E16902	630	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0417	0,0127	0,3089	0,3089	112,7654	15,99	365,00	24	-258,4236	-13%
34	E13949	630	1,0	12	5	2	2	5	4	0,0247	0,0077	0,1347	0,1347	49,1793	6,87	365,00	55	-329,7925	Não Calc.
35	E10679	1000	1,0	3	2	4	2	5	4	0,0096	0,0019	0,0241	0,0241	8,7915	1,25	365,00	309	-375,1309	Não Calc.
39	VN106073	1600	1,0	12	5	7	2	5	4	0,0574	0,0152	0,3793	0,3793	138,4263	19,63	365,00	20	-229,6061	-11%
19	E11341	630	1,0	18	7	7	2	5	4	0,0362	0,0110	0,2676	0,2676	97,6622	13,85	365,00	26	-275,3669	Não Calc.
37	E12110	1000	1,0	24	9	7	2	5	4	0,0106	0,0022	0,0535	0,0535	19,5120	2,77	365,00	139	-363,0963	Não Calc.
7	VN100121	450	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0290	0,0012	0,0655	0,0655	23,8909	3,39	365,00	114	-358,1807	Não Calc.
6	VN100120	750	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0959	0,0387	2,1109	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
17	VN199110	450	1,6	45	16	1	3	1	3	0,0537	0,0128	0,5637	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
18	VN199111	800	1,0	45	16	1	3	1	3	0,0761	0,0159	0,9869	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
14	E11823	450	1,0	30	11	1	3	5	4	0,0505	0,0110	1,1880	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
36	E15958	630	1,0	27	9	2	3	5	4	0,0712	0,0158	1,8972	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
22	E13607	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0456	0,0144	1,0099	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
23	E13608	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0344	0,0116	0,8700	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
25	VN1-45P4	300	1,0	27	10	2	4	1	3	0,0234	0,0023	0,3321	0,3321	121,2165	17,19	365,00	22	-248,9253	-12%
24	VN1-45P1	450	1,0	30	11	2	4	1	3	0,0397	0,0095	1,2987	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
4	VA197004	630	1,0	42	15	2	4	1	3	0,0600	0,0110	1,3655	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
13	E12734	450	1,0	8	3	3	4	1	3	0,0159	0,0051	0,6800	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
11	E12727	1000	1,0	24	7	3	4	1	3	0,0880	0,0170	3,1119	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
12	E12730	1600	1,0	28	8	3	4	1	3	0,1235	0,0280	7,3730	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
1	VN105003	800	2,5	72	21	2	4	3	4	0,1430	0,0740	7,0726	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
10	E10458	1600	1,0	12	4	3	4	5	4	0,0539	0,0162	2,2750	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
8	E11477	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1227	0,0488	14,6310	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%
9	E11478	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1230	0,0489	10,1562	0,4080	148,9200	21,12	365,00	18	-217,8261	-10%

Legenda:

(1) - Tipo de Edifício:	(2) - Categoria de Utilização:	(3) - Tecnologia de Tração:	(4) - Arquitectura Sistema:	(5) - Tipo de máquina:
1 - Habitação	1 - Muito baixa	1 - Ascensor eléctrico	1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa central	1 - Máquina com redutor de 1 velocidade
2 - Escritórios	2 - Baixa	2 - Ascensor hidráulico	2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral	2 - Máquina com redutor de 2 velocidades
3 - Hospital	3 - Média		3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1, indirecta	3 - Máquina com redutor e VVVF
4 - Shopping	4 - Elevada		4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral	4 - Máquina sem redutor e VVVF
5 - Transporte	5 - Muito elevada		5 - Sem casa de máquinas, suspensão central	5 - Válvulas hidráulicas controladas
6 - Indústria			6 - Pistão central	6 - Válvulas hidráulicas reguladas
7 - Outros			7 - Sistema hidráulico	7 - Outros
			8 - Outros	

4.2 Hipótese 2: Carregamento de um super-condensador

A grande maioria dos ascensores eléctricos com roda de aderência instalados a partir de 2000 estão já equipados com um conversor de frequência. Infelizmente estes sistemas com conversores de frequência dissipam normalmente a energia gerada através de uma resistência. Será possível aumentar a eficiência do sistema se a energia gerada for armazenada para ser utilizada numa fase subsequente em que se consome energia eléctrica. Seguindo esta ideia, desenvolveram-se sistemas de recuperação de energia baseados em supercondensadores. Os supercondensadores têm encontrado uma grande aplicação como dispositivos de armazenagem nos sistemas de conversão de potência devido às suas vantagens face aos condensadores convencionais e às baterias electroquímicas: elevada densidade de potência, alta eficiência, alta capacidade de ciclos e longa duração.

Esta hipótese de trabalho pode ser subdividida em duas sub-hipóteses:

- + A primeira, em que a energia armazenada no supercondensador é utilizada para alimentar cargas quando o ascensor está em *stand-by* (situação semelhante à descrita na hipótese 1 – ver ponto 4.1)
- + Uma segunda, que prevê que a energia armazenada no super-condensador seja utilizada quando o sistema de tracção muda de modo gerador para modo motor e ocorre um pico de corrente. Neste momento em que o ascensor arranca, o supercondensador disponibiliza durante milisegundos uma energia adicional que não tem de ser fornecida pela rede eléctrica do edifício – este será o benefício obtido, que se materializará no *cash-flow* de exploração.

4.2.1 Hipótese 2.1: alimentação dos circuitos em *stand-by*

Descrição da solução técnica:

Esta hipótese de trabalho é idêntica à apresentada em 5.1. Contudo a energia recuperada é utilizada para carregar um supercondensador. Como se viu anteriormente um supercondensador tem uma densidade energética inferior à de uma bateria, mas pode ser carregado mais rapidamente. A energia armazenada no supercondensador deverá ser depois utilizada para alimentar os circuitos de corrente contínua do ascensor, quando este se encontra em modo *stand-by*.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Como dificuldades técnicas que podem surgir na implementação da solução podem referir-se:

- Pulsção da corrente DC que circula no barramento DC⁵⁶ do conversor electrónico de frequência.
- Elevada tensão no barramento DC, face à baixa tensão necessária nos circuitos que têm de ser alimentados quando o ascensor está em modo *stand-by*. Tipicamente, em modo gerador, o barramento DC do conversor apresenta tensões na ordem 700 V, enquanto a tensão necessária para alimentar os circuitos é de 24 V DC.
- O supercondensador pode ser rapidamente descarregado, havendo uma grande dificuldade em garantir uma tensão constante (esta varia proporcionalmente com a carga).
- Necessidade de um sistema que faça a gestão da carga e da descarga do supercondensador. O supercondensador apenas deve descarregar quando o ascensor se encontrar em *stand-by*. Por outro lado, este não deve ser carregado para além da sua capacidade.

O sistema que permitirá carregar o supercondensador terá a seguinte configuração:

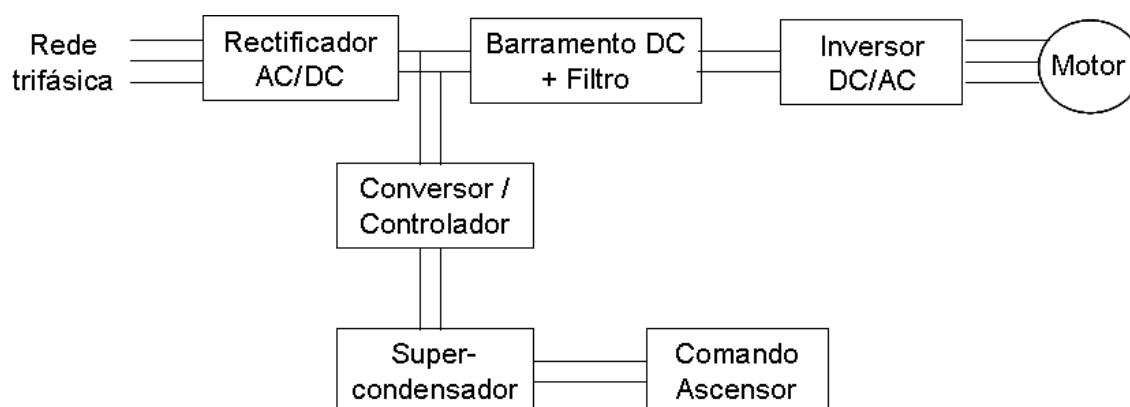


Figura 19 – Carregamento de supercondensador e alimentação do comando do ascensor em *stand-by*

Fonte: Autor

O sistema é composto por um conversor DC-DC que é interligado com o barramento DC do conversor electrónico de frequência e que através de um carregador apropriado carrega um

⁵⁶ Corrente contínua é a corrente que passa por um condutor ou por um circuito num só sentido (Gussow, 2004). Uma fonte de tensão contínua não muda a polaridade da tensão de saída. Por outro lado, uma tensão de corrente alternada inverte ou alterna periodicamente a polaridade da tensão. A corrente contínua pode ser classificada em corrente contínua constante ou em corrente contínua pulsante.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

conjunto de supercondensadores, com uma tensão de 48 V e uma capacidade de 165 F. O supercondensador seleccionado terá as seguintes características técnicas:

Tabela 9 – Características técnicas do supercondensador seleccionado

Fabricante	Maxwell Technologies
Modelo	BMOD0165 P048 BXX 
Capacidade	165 F
Tensão de funcionamento	48 V
Peso	13,5 kg
Dimensões (L x P x A)	416 mm x 190 mm x 160 mm
Número de células	18
Protecção	IP 65
Potência específica	3,3 W/kg
Energia específica	3,9 Wh/kg
Energia armazenada	53 Wh

O funcionamento do sistema é idêntico ao descrito no ponto 4.1.

Vantagens e desvantagens da solução:

Vantagens:

- + Sistema de fácil instalação: ligação ao barramento DC e ao circuito de alimentação do comando em 24 V.
- + Sistema permite mais de um milhão de ciclos de carga e descarga.
- + Sistema permite uma carga rápida dos supercondensadores.
- + Não existe reinjecção na rede do edifício, e logo não existe potencial de perturbação na rede eléctrica do edifício.

Desvantagens:

- + Baixa densidade energética do sistema de armazenagem (o supercondensador descarrega rapidamente).
- + Dificuldade em garantir uma tensão constante de 24 V DC à medida que a carga se reduz.

Custos / investimento:

O sistema de supercondensadores a instalar num ascensor terá um custo de 1500 Euros. Este valor foi calculado a partir dos componentes utilizados (Fonte: Schmitt-Elevadores, Lda.)

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Avaliação do investimento:

Utilizando as medições realizadas e apresentadas no ponto 3., calculou-se para cada um dos ascensores, e aplicando a metodologia definida, a energia recuperada previsual ao longo de um ano. Calculou-se igualmente a energia eléctrica em *stand-by* que cada um dos ascensores irá previsualmente necessitar ao longo de um ano. A energia fornecida pelo supercondensador será a energia que não será necessário comprar à rede pública, pelo que será esse o benefício que se obterá com esta solução.

O *cash-flow* anual será então dado pela energia não comprada à rede multiplicada pelo preço de compra de cada kWh à rede pública.

Com base nos *cash-flows* de exploração calculados e no *cash-flow* de investimento, é calculado o VAL, a TIR e o PRA. Apresentam-se na tabela 10 os resultados obtidos para cada um dos ascensores da amostra.

Conclusões:

A partir dos dados obtidos com as medições realizadas em todos os ascensores da amostra é possível apresentar as seguintes conclusões:

1. Apesar de ser tecnicamente executável, esta solução não é viável para nenhum dos ascensores estudados, atendendo ao estudo económico-financeiro realizado. Perante a baixa energia específica dos supercondensadores quando comparados com a energia específica das baterias, os resultados obtidos são muito mais desfavoráveis do que na hipótese de trabalho anterior (carregamento de uma bateria).
2. Quanto mais elevada a categoria de utilização a que pertence o ascensor, e logo maior o número de viagens realizadas ao longo de um ano, menos desvantajosa se torna a instalação desta solução. Para todos os ascensores estudados o período de recuperação do investimento é muito superior ao período de vida útil do próprio ascensor (que normalmente varia entre 20 e 25 anos).
3. Tecnicamente fará sentido aplicar este sistema em situações em que exista apenas um único ascensor no edifício, o que ocorre normalmente e frequentemente em edifícios habitacionais. Para edifícios com dois ou mais ascensores existirão outras soluções em que seja possível recuperar a energia, conforme se irá ver nas hipóteses de trabalho seguintes.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 10 – Resultados da Hipótese 2.1: Carregamento de Supercondensador – Alimentação dos circuitos em *stand-by*

Tabela de Medições e de Resultados - Hipótese 2.1: Carregamento de Supercondensador - Alimentação do *Stand-by*

Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Número de Pisos	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Arquitetura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Energia diária modo gerador [kWh]	Energia diária armazenável no supercondensador [kWh]	Energia armazenável no supercondensador anual [kWh]	Valor poupado anualmente [€]	Valor do investimento [€]	Período de Recuperação Atualizado (PRA) [Anos]	Valor Actual Líquido (VAL) [€]	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) [%]
3	E12940	450	1,0	12	5	1	1	4	3	0,0230	0,0010	0,0067	0,0067	2,4333	0,35	1500,00	4347	-1497,2684	Não Calc.
2	E10253	450	1,0	15	6	1	1	5	4	0,0170	0,0060	0,0635	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
27	E17048	630	1,0	3	2	2	1	5	4	0,0131	0,0014	0,0139	0,0139	5,0688	0,72	1500,00	2087	-1494,3099	Não Calc.
5	VN100000	630	1,0	4	2	2	1	5	4	0,0066	0,0009	0,0054	0,0054	1,9710	0,28	1500,00	5367	-1497,7874	Não Calc.
26	E14306	630	1,0	6	3	7	1	5	4	0,0130	0,0034	0,0536	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
20	E17222	320	0,6	12	5	1	2	1	3	0,0164	0,0014	0,0271	0,0271	9,8903	1,40	1500,00	1070	-1486,8974	Não Calc.
21	VN103037	320	1,0	12	5	1	2	1	3	0,0176	0,0025	0,0471	0,0471	17,2039	2,44	1500,00	615	-1480,6673	Não Calc.
15	E10764	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0177	0,0065	0,1051	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
16	E10769	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0255	0,0054	0,0908	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
38	VN106072	630	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0226	0,0089	0,1890	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
28	VN107014	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0258	0,0092	0,1836	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
29	VN107012	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0283	0,0089	0,1430	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
30	VN107016	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0257	0,0089	0,2218	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
31	E14061	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0262	0,0093	0,1744	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
33	E16907	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0225	0,0080	0,2250	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
32	E16902	630	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0417	0,0127	0,3089	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
34	E13949	630	1,0	12	5	2	2	5	4	0,0247	0,0077	0,1347	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
35	E10679	1000	1,0	3	2	4	2	5	4	0,0096	0,0019	0,0241	0,0241	8,7915	1,25	1500,00	1203	-1490,1309	Não Calc.
39	VN106073	1600	1,0	12	5	7	2	5	4	0,0574	0,0152	0,3793	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
19	E11341	630	1,0	18	7	7	2	5	4	0,0362	0,0110	0,2676	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
37	E12110	1000	1,0	24	9	7	2	5	4	0,0106	0,0022	0,0535	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
7	VN100121	450	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0290	0,0012	0,0655	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
6	VN100120	750	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0959	0,0387	2,1109	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
17	VN199110	450	1,6	45	16	1	3	1	3	0,0537	0,0128	0,5637	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
18	VN199111	800	1,0	45	16	1	3	1	3	0,0761	0,0159	0,9869	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
14	E11823	450	1,0	30	11	1	3	5	4	0,0505	0,0110	1,1880	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
36	E15958	630	1,0	27	9	2	3	5	4	0,0712	0,0158	1,8972	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
22	E13607	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0456	0,0144	1,0099	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
23	E13608	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0344	0,0116	0,8700	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
25	VN1-45P4	300	1,0	27	10	2	4	1	3	0,0234	0,0023	0,3321	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
24	VN1-45P1	450	1,0	30	11	2	4	1	3	0,0397	0,0095	1,2987	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
4	VA197004	630	1,0	42	15	2	4	1	3	0,0600	0,0110	1,3655	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
13	E12734	450	1,0	8	3	3	4	1	3	0,0159	0,0051	0,6800	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
11	E12727	1000	1,0	24	7	3	4	1	3	0,0880	0,0170	3,1119	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
12	E12730	1600	1,0	28	8	3	4	1	3	0,1235	0,0280	7,3730	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
1	VN105003	800	2,5	72	21	2	4	3	4	0,1430	0,0740	7,0726	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
10	E10458	1600	1,0	12	4	3	4	5	4	0,0539	0,0162	2,2750	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
8	E11477	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1227	0,0488	14,6310	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.
9	E11478	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1230	0,0489	10,1562	0,0530	19,3450	2,74	1500,00	547	-1478,2638	Não Calc.

4.2.2 Hipótese 2.2: alimentação do barramento DC com o ascensor em movimento

Descrição da solução técnica:

Antes de analisar em detalhe esta hipótese de trabalho, convém recordar brevemente o dimensionamento de um supercondensador (Attaianesse, et. al. 2007):

O primeiro passo no dimensionamento do supercondensador passa pela definição do objectivo pretendido, que pode ser um de três:

- fornecimento parcial da energia necessária pelo motor durante a fase de aceleração;
- fornecimento total da energia necessária pelo motor durante a fase de aceleração;
- fornecimento da energia necessária pelo motor para assegurar a operação *steady state* durante um intervalo de tempo T limitado.

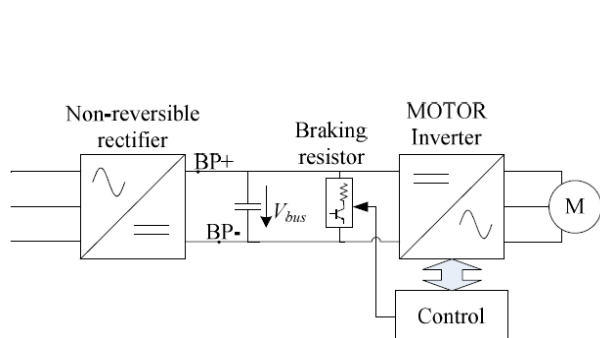


Figura 20 – Solução sem recuperação de energia
Fonte: Oyarbide et. al., 2011

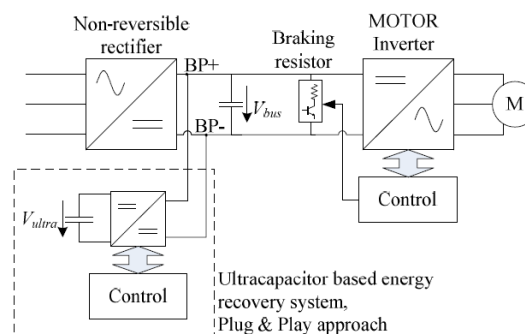


Figura 21 – Solução com recuperação de energia
Fonte: Oyarbide et. al., 2011

O sistema de controlo do conversor de frequência pode ser completado com um sistema de armazenamento de energia. Dependendo da carga, do número de pisos servidos e de outros factores, o sistema de controlo determina a energia a trocar com o sistema de supercondensadores. Este sistema requer uma comunicação permanente entre o conversor de frequência do ascensor e o dispositivo de armazenamento de energia, conforme é indicado na figura 21.

Para obter uma elevada flexibilidade e eficiência do sistema de conversão de frequência, a bateria de supercondensadores é interligada ao conversor através do barramento DC. O sistema de controlo do conversor depende dos requisitos do sistema: controlo da tensão do barramento DC, controlo do estado de carga do supercondensador e a partilha activa de energia entre o conversor e o supercondensador.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Oyarbide *et. al.* (2011) propõem um sistema *stand-alone* de armazenamento de energia por super-condensadores *plug & play* com as seguintes características:

1. Aplicação generalizada: isto é, o sistema deve poder ser operado com qualquer conversor de frequência existente;
2. Capacidade *plug & play*, não sendo necessária uma reprogramação ou modificação do conversor de frequência existente. Apenas 2 cabos eléctricos terão de ser interligados e o sistema deverá funcionar por si;
3. Capacidade de modernização: existem vários milhares de ascensores não eficientes instalados. Uma abordagem *plug & play* permite, sem a substituição de qualquer componente, um *up-date* destas instalações tornando-as mais eficientes.

O conceito básico do conversor de frequência regenerativo baseado em supercondensadores é dado por um conversor de frequência (constituído por rectificador, barramento DC e um inversor) e por um sistema de armazenamento de energia ligado em paralelo e que é composto por uma bateria de supercondensadores e por um conversor de potência DC-DC bidirecional.

O sistema completo opera em diferentes modos:

1. Sistema em modo motor alimentado a partir da rede: a tensão do barramento DC é ligeiramente inferior à tensão de pico fase-fase de *input*. O conversor DC-DC controla a tensão do supercondensador de forma a evitar o fluxo de energia entre o supercondensador e o barramento DC.
2. Sistema em modo gerador: dado que a carga no barramento DC é negativa (a potência do conversor é negativa), o condensador existente no barramento DC é carregado até atingir a sua tensão máxima. Quando esta é atingida, passa a haver um fluxo de energia com o supercondensador: a corrente do supercondensador é positiva e a sua tensão vai crescendo: a energia recuperada está a ser armazenada na bateria de condensadores. Não existe, por isso, qualquer consumo de energia a partir da rede. O supercondensador foi concebido e dimensionado para armazenar uma dada quantidade de energia durante a fase de recuperação de energia. Quando a energia armazenada superar a energia máxima dimensionada, a energia remanescente é canalizada para a resistência de dissipação.
3. Sistema em modo *stand-by*. Não existe qualquer fluxo de energia entre o conversor, a rede e a bateria de supercondensadores. A tensão da bateria de supercondensadores é mantida constante, bem como a tensão do barramento DC.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

4. Sistema em modo motor alimentado a partir da bateria de supercondensadores. O controlador da tensão do barramento DC actua sobre o conversor dc-dc por forma a manter a tensão do barramento DC constante. O supercondensador é descarregado alimentando o motor, e a sua tensão decresce até um nível intermédio previamente fixado. A partir deste ponto, o sistema começa novamente a ser alimentado a partir da rede de alimentação e o supercondensador é desactivado. O ciclo recomeça.

A empresa Michael Koch, GmbH desenvolveu um sistema de armazenamento dinâmico de energia por supercondensadores, o modelo DES 2.0, que pode ser instalado em qualquer ascensor que já seja dotado de um conversor electrónico de frequência (ver figura 22). O equipamento será interligado com o barramento DC do conversor e está dimensionado para trabalhar até uma tensão máxima de 850 V DC. A tensão de funcionamento é determinada automaticamente pelo sistema. Toda a energia que levaria a que a tensão do barramento DC subisse acima desse valor de funcionamento é armazenada nos supercondensadores. Em sentido contrário, quando a tensão cai abaixo desse nível de tensão de funcionamento, os supercondensadores injectam a energia armazenada no barramento DC do conversor. Quando o nível de energia nos supercondensadores desce abaixo do nível de tensão dinâmico definido, após fornecimento de energia ao motor, o sistema é desligado, ficando à espera da próxima fase em que o motor seja novamente operado em modo gerador, para voltar a carregar os supercondensadores.

O módulo central tem uma capacidade máxima de 1600 Ws para uma potência máxima de 18 kW. Caso seja necessário, é possível expandir a capacidade através de módulos de expansão de 1600 Ws ou de 3200 Ws, ligados em paralelo. Estes módulos de expansão podem ser facilmente interligados com o módulo central através de um cabo adequado (ver figura 23).

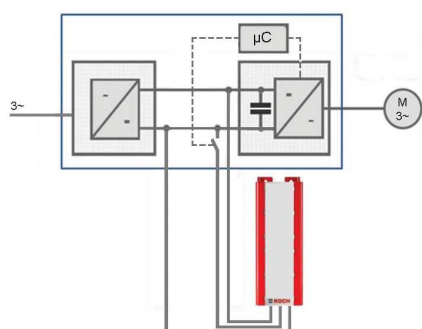


Fig. 22 – Esquema DES 2.0

Fonte: Michael Koch, GmbH (2012)

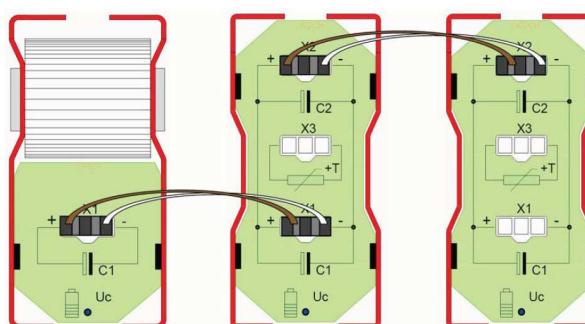


Fig. 23 – Interligação DES 2.0

Fonte: Michael Koch, GmbH (2012)

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Os gráficos seguintes pretendem demonstrar a poupança que se pode obter se se instalar um sistema de recuperação com supercondensadores DES 2.0:

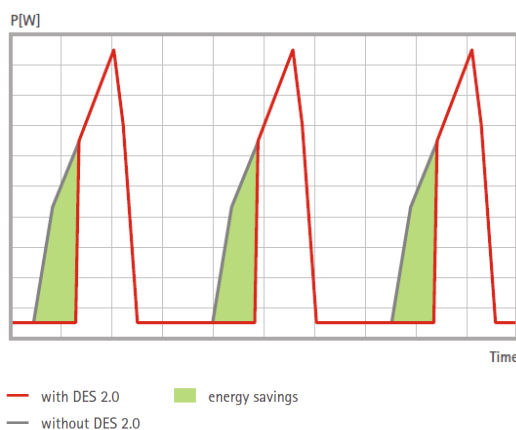


Figura 24 – Poupança de energia com o DES2.0

Fonte: Michael Koch, GmbH (2012)

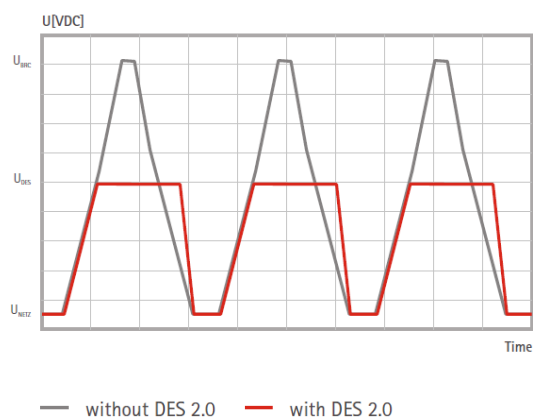


Figura 25 – Curva de tensão barramento DC

Fonte: Michael Koch, GmbH (2012)

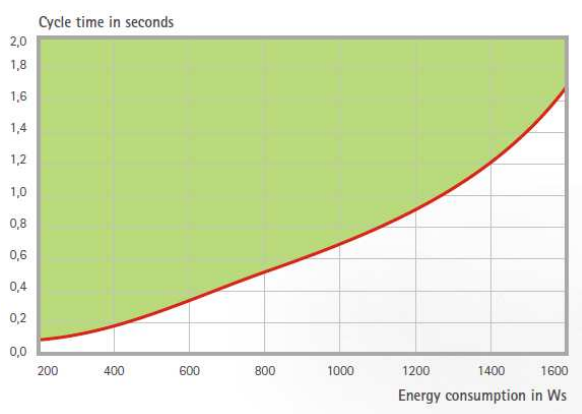


Figura 26 – Diagrama Flutuação energética / ciclo temporal

Fonte: Michael Koch, GmbH (2012)



Figura 27 – Aspecto do supercondensador DES 2.0

Fonte: Michael Koch, GmbH (2012)

Vantagens e desvantagens da solução:

Vantagens desta solução:

- + Recuperação de energia: a energia excedentária é armazenada no sistema de super-condensadores e pode ser reutilizada quando o sistema necessita de consumir energia, sendo a troca de energia realizada pelo barramento DC.
- + Mitigação do pico de potência de rede: mantendo uma reserva mínima de energia, o dispositivo permite reduzir o pico de potência consumido a partir da rede.
- + *Back-up* de energia para uma viagem de emergência: é possível armazenar energia necessária para a operação de emergência, em caso de falha de energia da rede. Segundo Grbović, *et. al* (2012) a bateria de supercondensadores pode fornecer

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

energia assumindo uma função de fonte de energia de emergência. Esta solução permite aumentar a eficiência global do sistema de conversão de frequência.

- + O alisamento da potência de *input* permite um melhor dimensionamento da instalação de todo o sistema a nível da cablagem, fusíveis / protecções e contactores.
- + A estratégia de *plug & play* é desenvolvida de forma a que caso o sistema de armazenamento de energia não consiga fornecer toda a energia necessária ele não interfira com a normal operação do conversor, isto é, a potência é absorvida a partir da rede de forma normal. Caso o sistema de armazenamento esteja plenamente carregado, este pára de armazenar energia, a tensão no barramento DC aumenta e a resistência de dissipação é activada.
- + Se a necessidade de potência do ascensor for superior à potência disponível no conversor de frequência, apenas a diferença será absorvida a partir da rede de alimentação, minimizando desta forma o consumo energético do sistema.
- + Não existe qualquer interferência na rede eléctrica pública.

Desvantagens desta solução:

- + Elevado custo da solução: para cada ascensor serão necessários vários módulos.
- + Dimensão de cada módulo: 100 mm x 201 x 300 (Largura x Profundidade x Altura)
- + Peso de cada módulo: unidade central 6,9 kg; módulo adicional 4,1 kg

Custos / investimento:

O sistema de supercondensadores *plug & play* DES 2.0 da Koch a instalar num ascensor terá um custo variável em função do número de módulos a instalar (e que resultará da energia recuperada). O custo para o módulo base DES 2.0 será de 1190 €, para o módulo de expansão (referência EM 2.0 A2020) de 3.200 Ws será de 1170 € e para o módulo de expansão (referência EM 2.0 A20) de 1.600 Ws será de 675 €.

Avaliação do investimento:

Utilizando as medições realizadas e apresentadas no ponto 3., calculou-se para cada um dos ascensores, e aplicando a metodologia definida, a energia recuperada previsional ao longo de um ano, em função do número de manobras que serão realizadas. Pressupondo que toda a energia recuperada e armazenada no supercondensador pode ser reinjectada

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

na máquina quando esta estiver a operar em modo motor, então esta energia total reinjectada na máquina será o benefício que se obterá com esta solução.

O *cash-flow* anual será então dado pela energia reinjectada (que se traduz em energia que não é comprada à rede) multiplicado pelo preço de compra de cada kWh à rede eléctrica pública.

Com base nos *cash-flows* de exploração calculados e no *cash-flow* de investimento, é calculado o VAL, a TIR e o PRA. Apresentam-se na tabela 11 os resultados obtidos para cada um dos ascensores da amostra.

Conclusões:

A partir dos dados obtidos com as medições realizadas em todos os ascensores da amostra é possível apresentar as seguintes conclusões:

1. Apesar de ser tecnicamente executável, esta solução não é viável para nenhum dos ascensores estudados, atendendo ao estudo económico-financeiro realizado.
2. Quanto mais elevada a categoria de utilização a que pertence o ascensor, e logo maior o número de viagens realizadas ao longo de um ano, menos desvantajosa se torna a instalação desta solução. Contudo, para todos os ascensores estudados o período de recuperação do investimento é muito superior ao período de vida útil do próprio ascensor (que normalmente varia entre 20 e 25 anos).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 11 – Resultados da Hipótese 2.2: Carregamento de Supercondensador – Reinjeção no barramento DC

Tabela de Medições e de Resultados - Hipótese 2.2: Carregamento de supercondensador - barramento DC																					
Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Número de Pisos	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Arquitectura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Ws	Capacidade máxima Ws	Nº Manobras/dia	Energia poupada diária kWh	Energia poupada anual kWh	Valor poupado anualmento [€]	Valor do investimento [€]	Período de Recuperação Actualizado (PRA) [Anos]	Valor Actual Líquido (VAL) [€]	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) [%]
3	E12940	450	1,0	12	5	1	1	4	3	0,0230	0,0010	3600	1600	7	0,0030	1,0815	0,15	1190,00	7760	-1188,7860	Não Calc.
2	E10253	450	1,0	15	6	1	1	5	4	0,0170	0,0060	21600	1600	11	0,0047	1,7176	0,24	1190,00	4986	-1188,0718	Não Calc.
27	E17048	630	1,0	3	2	2	1	5	4	0,0131	0,0014	5069	1600	10	0,0044	1,6000	0,23	1190,00	5245	-1188,2039	Não Calc.
5	VN100000	630	1,0	4	2	2	1	5	4	0,0066	0,0009	3348	1600	6	0,0026	0,9419	0,13	1190,00	6909	-1188,9426	Não Calc.
26	E14306	630	1,0	6	3	7	1	5	4	0,0130	0,0034	12330	1600	16	0,0070	2,5391	0,36	1190,00	3305	-1187,1496	Não Calc.
20	E17222	320	0,6	12	5	1	2	1	3	0,0164	0,0014	5040	1600	19	0,0086	3,1398	0,45	1190,00	2673	-1186,4754	Não Calc.
21	VN103037	320	1,0	12	5	1	2	1	3	0,0176	0,0025	9144	1600	19	0,0082	3,0103	0,43	1190,00	2788	-1186,6207	Não Calc.
15	E10764	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0177	0,0065	23328	1600	16	0,0072	2,6306	0,37	1190,00	3190	-1187,0469	Não Calc.
16	E10769	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0255	0,0054	19440	1600	17	0,0075	2,7290	0,39	1190,00	3075	-1186,9365	Não Calc.
38	VN106072	630	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0226	0,0069	24948	1600	27	0,0121	4,2424	0,63	1190,00	1897	-1185,0335	Não Calc.
28	VN107014	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0258	0,0092	33048	1600	20	0,0089	3,2444	0,46	1190,00	2587	-1186,3579	Não Calc.
29	VN107012	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0263	0,0089	32026	1600	16	0,0071	2,6071	0,37	1190,00	3219	-1187,0733	Não Calc.
30	VN107016	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0257	0,0089	31939	1600	25	0,0111	4,0556	0,58	1190,00	2069	-1185,4473	Não Calc.
31	E14061	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0262	0,0093	33480	1600	19	0,0083	3,0417	0,43	1190,00	2759	-1186,5855	Não Calc.
33	E16907	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0225	0,0080	26800	1600	26	0,0125	4,5625	0,65	1190,00	1839	-1184,8783	Não Calc.
32	E16902	630	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0417	0,0127	45720	1600	24	0,0108	3,9459	0,56	1190,00	2127	-1185,5704	Não Calc.
34	E13949	630	1,0	12	5	2	2	5	4	0,0247	0,0077	27756	1600	17	0,0078	2,8350	0,40	1190,00	2960	-1186,8176	Não Calc.
35	E10679	1000	1,0	3	2	4	2	5	4	0,0096	0,0019	6696	1600	13	0,0058	2,1007	0,30	1190,00	3995	-1187,6418	Não Calc.
39	VN106073	1600	1,0	12	5	7	2	5	4	0,0574	0,0152	54612	1600	25	0,0111	4,0556	0,58	1190,00	2069	-1185,4473	Não Calc.
19	E11341	630	1,0	18	7	7	2	5	4	0,0362	0,0110	39600	1600	24	0,0108	3,9459	0,56	1190,00	2127	-1185,5704	Não Calc.
37	E12110	1000	1,0	24	9	7	2	5	4	0,0106	0,0022	7805	1600	25	0,0110	4,0000	0,57	1190,00	2098	-1185,5097	Não Calc.
7	VN100121	450	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0290	0,0012	4320	1600	55	0,0242	8,8485	1,25	1190,00	948	-1180,0669	Não Calc.
6	VN100120	750	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0959	0,0387	139320	1600	55	0,0242	8,8485	1,25	1190,00	948	-1180,0669	Não Calc.
17	VN199110	450	1,6	45	16	1	3	1	3	0,0537	0,0128	46224	1600	44	0,0195	7,1220	1,01	1190,00	1178	-1182,0051	Não Calc.
18	VN199111	800	1,0	45	16	1	3	1	3	0,0761	0,0159	57240	1600	62	0,0276	10,0690	1,43	1190,00	833	-1178,8968	Não Calc.
14	E11823	450	1,0	30	11	1	3	5	4	0,0505	0,0110	39600	1600	108	0,0480	17,5200	2,48	1190,00	479	-1170,3325	Não Calc.
36	E15958	630	1,0	27	9	2	3	5	4	0,0712	0,0158	58916	1600	120	0,0533	19,4667	2,76	1190,00	431	-1168,1472	Não Calc.
22	E13607	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0456	0,0144	51840	1600	70	0,0312	11,3766	1,61	1190,00	738	-1177,2289	Não Calc.
23	E13608	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0344	0,0116	41760	1600	75	0,0333	12,1667	1,73	1190,00	690	-1176,3420	Não Calc.
25	VN1-45P4	300	1,0	27	10	2	4	1	3	0,0234	0,0023	8413	1600	142	0,0632	23,0526	3,27	1190,00	364	-1164,1217	Não Calc.
24	VN1-45P1	450	1,0	30	11	2	4	1	3	0,0397	0,0095	34200	1600	137	0,0608	22,1772	3,14	1190,00	378	-1165,1044	Não Calc.
4	VA197004	630	1,0	42	15	2	4	1	3	0,0600	0,0110	39600	1600	124	0,0552	20,1379	2,86	1190,00	417	-1167,9937	Não Calc.
13	E12734	450	1,0	8	3	3	4	1	3	0,0199	0,0051	18360	1600	133	0,0593	21,8296	3,07	1190,00	388	-1165,7191	Não Calc.
11	E12727	1000	1,0	24	7	3	4	1	3	0,0860	0,0170	61200	1600	183	0,0814	29,8949	4,21	1190,00	263	-1156,8652	Não Calc.
12	E12730	1600	1,0	28	8	3	4	1	3	0,1235	0,0280	100764	1600	263	0,1171	42,7317	6,06	1190,00	196	-1142,0304	Não Calc.
1	VN105003	800	2,5	72	21	2	4	3	4	0,1430	0,0740	266400	1600	96	0,0425	15,5044	2,20	1190,00	541	-1172,5951	Não Calc.
10	E10458	1600	1,0	12	4	3	4	5	4	0,0539	0,0162	58392	1600	140	0,0623	22,7532	3,23	1190,00	369	-1164,4578	Não Calc.
8	E11477	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1227	0,0488	175572	1600	300	0,1333	48,8867	6,90	1190,00	172	-1135,3680	Não Calc.
9	E11478	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1230	0,0489	176040	1600	208	0,0923	33,6923	4,78	1190,00	249	-1152,1778	Não Calc.

Legenda:

(1) - Tipo de Edifício:	(2) - Categoria de Utilização:	(3) - Tecnologia de Tração:	(4) - Arquitectura Sistema:	(5) - Tipo de máquina:
1 - Habitação	1 - Muito baixa	1 - Ascensor eléctrico	1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa central	1 - Máquina com redutor de 1 velocidade
2 - Escritórios	2 - Básica	2 - Ascensor hidráulico	2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral	2 - Máquina com redutor de 2 velocidades
3 - Hospital	3 - Média		3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1, indirecta	3 - Máquina com redutor e VVVF
4 - Shopping	4 - Elevada		4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral	4 - Máquina sem redutor e VVVF
5 - Transporte	5 - Muito elevada		5 - Sem casa de máquinas, suspensão central	5 - Válvulas hidráulicas controladas
6 - Indústria			6 - Pistão central	6 - Válvulas hidráulicas reguladas
7 - Outros			7 - Sistema hidrocabo	7 - Outros
			8 - Outros	

4.3 Hipótese 3: Reinjecção no barramento DC

Descrição da solução técnica:

Em edifícios em que existem dois ou mais ascensores instalados em bateria pode-se interligar directamente os barramentos DC dos conversores. Assim, se um ou mais dos ascensores estiverem em modo gerador será possível utilizar a energia recuperada e alimentar pelo menos um conversor que esteja a operar em modo motor. Esta solução aumenta a eficiência de todo o sistema dado que a energia recuperada não é dissipada na resistência de frenagem e o conversor que se encontra em modo motor terá de solicitar menos energia à rede eléctrica do edifício.

Trata-se de uma solução muito utilizada em sistemas de tapetes rolantes para transporte de cargas com vários motores onde uma substancial quantidade de energia é utilizada para acelerar e travar. Pretende-se aplicar uma solução idêntica em ascensores.

A ligação directa dos barramentos DC dos conversores englobará também a ligação directa de todos os condensadores do barramento DC. Estes condensadores armazenam uma quantidade substancial de energia. Em caso de um defeito, toda a energia armazenada em todos os condensadores interligados, será canalizada para o defeito podendo causar uma destruição substancial no conversor que apresenta o defeito, bem como nos outros conversores. Assim, será necessário prever uma protecção adequada por fusíveis entre os cabos de interligação dos barramentos DC e os conversores individuais (CT, 2011).

Quando os conversores são ligados em paralelo a capacidade total dos condensadores é muito superior o que leva a um aumento da corrente de entrada na fase inicial de arranque do sistema, quando os condensadores são carregados. Esta corrente de entrada é normalmente controlada utilizando um circuito composto por resistência / relé de *bypass* ou uma ponte controlada por tirístores, que é gradualmente desligada. A configuração de input (incluindo os fusíveis) tem de ter capacidade para fornecer esta corrente de *input*.

Uma vez que a energia recuperada é reinjectada apenas no barramento DC, ou seja fica num sistema fechado composto por todos os conversores dos ascensores que constituem a bateria, no momento de recuperação da energia não existe qualquer interferência com a rede eléctrica do edifício.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia



Figura 28 – Esquema de interligação de conversores através do barramento DC

Fonte: Control Techniques

Vantagens e desvantagens da solução :

Esta solução apresenta as seguintes vantagens:

- + Uma poupança de energia, pois permite o aproveitamento da energia que seria dissipada na resistência regenerativa, e evita que o conversor que esteja em modo motor tenha de recorrer menos à alimentação da rede eléctrica do edifício.
- + Fácil interligação dos conversores existentes. É apenas necessário interligar os barramentos DC de cada conversor através das ligações que já existem em cada conversor.
- + Baixo custo com a instalação dos fusíveis e respectivos cabos de interligação.
- + Não existe reinjecção na rede do edifício, e logo não existe potencial de perturbação na rede eléctrica do edifício.

Desvantagens desta solução:

- + Necessidade de protecções especiais (o que exige um dimensionamento cuidadoso de todo o sistema) para evitar que um defeito possa danificar os conversores electrónicos de frequência.
- + Necessidade de existirem pelo menos 2 ascensores no mesmo edifício que possam ser fisicamente interligados.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Custos / investimento:

Os custos inerentes à interligação dos conversores electrónicos de frequência, incluindo a cablagem de interligação com um comprimento de 10 m, bem como as protecções de interligação necessárias implicam um custo de 560 Euros (para cada 2 ascensores interligados).

Avaliação do investimento:

Com base nas medições realizadas, calculou-se para cada um dos ascensores medidos, e aplicando a metodologia definida, a energia recuperada ao longo de um ano.

Pressupondo que:

- a. cada um desses ascensores pode ser fisicamente interligado com outro ascensor e que
- b. toda a energia recuperada num ascensor pode ser reinjectada no outro ascensor,

então, a energia recuperada por um dos ascensores será a energia que não será necessário comprar à rede pública para alimentar o segundo ascensor. Esse será o benefício que se obtém com esta solução.

O *cash-flow* anual será então dado pela energia não comprada à rede pública multiplicada pelo preço de compra de cada kWh à rede eléctrica pública.

Com base nos *cash-flows* de exploração calculados e no *cash-flow* de investimento, é calculado o VAL, a TIR e o PRA. Apresentam-se na tabela 12 os resultados obtidos para cada um dos ascensores da amostra.

Conclusões:

A partir dos dados obtidos com as medições realizadas em todos os ascensores da amostra é possível apresentar as seguintes conclusões:

1. Esta solução só é tecnicamente viável em situações em que existam pelo menos 2 ascensores no edifício e que seja possível interligá-los fisicamente.
2. Dos 39 ascensores da amostra, 8 apresentam um VAL (valor actual líquido) positivo, recomendando-se por isso que nesses ascensores o investimento de interligação dos barramentos DC dos conversores de frequência seja realizado.
3. Dos 8 ascensores com VAL positivo, 7 encontram-se nas categorias de utilização 4 e 5. Quanto mais elevada a categoria de utilização, maior o benefício que se obtém com a implementação da solução apresentada e logo maior o retorno que se obtém realizando o investimento. Para os 8 ascensores com VAL >0, o período de

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

recuperação variará entre 1 e 8 anos. Para os ascensores da categoria de utilização 5 a recuperação do investimento ocorrerá num espaço temporal de apenas 1 ano.

4. Quanto mais elevada a categoria de utilização a que pertence o ascensor, e logo quanto maior o número de viagens realizadas ao longo de um ano, mais vantajosa se torna a adopção desta solução.
5. Esta solução deverá ser recomendada para ascensores que tenham uma carga nominal superior a 630 kg, velocidades elevadas e que pertençam às categorias de utilização 4 e 5.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 12 – Resultados da Hipótese 3: Reinjeção no barramento DC

Tabela de Medições e de Resultados - Hipótese 3: Reinjeção no barramento DC																			
Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Número de Pisos	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Arquitectura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Energia diária modo gerador [kWh]	Energia recuperada anual [kWh]	Valor poupado anualmento [€]	Valor do investimento [€]	Período de Recuperação Actualizado (PRA) [Anos]	Valor Actual Líquido (VAL) [€]	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) [%]	
9	E11478	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1230	0,0489	9,7800	3569,70	506,18	560,00	1	3447	90%	
1	VN105003	800	2,5	72	21	2	4	3	4	0,1430	0,0740	11,7529	4289,82	608,30	560,00	1	4256	109%	
8	E11477	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1227	0,0488	14,4306	5267,16	746,88	560,00	1	5353	133%	
10	E10458	1600	1,0	12	4	3	4	5	4	0,0539	0,0162	1,4127	515,64	73,12	560,00	8	19	5%	
12	E12730	1600	1,0	28	8	3	4	1	3	0,1235	0,0280	6,5716	2398,62	340,12	560,00	2	2133	60%	
11	E12727	1000	1,0	24	7	3	4	1	3	0,0890	0,0170	1,9742	720,58	102,18	560,00	5	249	13%	
6	VN100120	750	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0959	0,0387	2,1544	786,37	111,51	560,00	5	323	15%	
4	VA197004	630	1,0	42	15	2	4	1	3	0,0600	0,0110	1,0703	390,65	55,39	560,00	10	-121	0%	
22	E13607	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0456	0,0144	0,7267	265,26	37,61	560,00	15	-262	-7%	
17	VN199110	450	1,6	45	16	1	3	1	3	0,0537	0,0128	1,0505	383,45	54,37	560,00	10	-130	-1%	
24	VN1-45P1	450	1,0	30	11	2	4	1	3	0,0397	0,0095	1,1400	416,10	59,00	560,00	9	-93	1%	
36	E15958	630	1,0	27	9	2	3	5	4	0,0712	0,0158	0,7623	278,23	39,45	560,00	14	-248	-6%	
18	VN199111	800	1,0	45	16	1	3	1	3	0,0761	0,0159	1,1925	435,26	61,72	560,00	9	-71	2%	
14	E11823	450	1,0	30	11	1	3	5	4	0,0505	0,0110	0,6188	225,84	32,02	560,00	17	-306	-9%	
23	E13608	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0344	0,0116	0,9788	357,24	50,66	560,00	11	-159	-2%	
13	E12734	450	1,0	8	3	3	4	1	3	0,0159	0,0051	0,7443	271,68	38,52	560,00	15	-255	-6%	
25	VN1-45P4	300	1,0	27	10	2	4	1	3	0,0234	0,0023	0,2450	89,44	12,68	560,00	44	-460	Não Calc.	
39	VN106073	1600	1,0	12	5	7	2	5	4	0,0574	0,0152	0,1964	71,70	10,17	560,00	55	-480	Não Calc.	
30	VN107016	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0257	0,0089	0,2218	80,96	11,48	560,00	49	-469	-22%	
19	E11341	630	1,0	18	7	7	2	5	4	0,0362	0,0110	0,2676	97,66	13,85	560,00	40	-450	Não Calc.	
34	E13949	630	1,0	12	5	2	2	5	4	0,0247	0,0077	0,1901	69,39	9,84	560,00	57	-482	Não Calc.	
32	E16902	630	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0417	0,0127	0,2309	84,26	11,95	560,00	47	-465	Não Calc.	
31	E14061	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0262	0,0093	0,1691	61,72	8,75	560,00	64	-491	Não Calc.	
38	VN106072	630	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0226	0,0069	0,1014	37,02	5,25	560,00	107	-518	Não Calc.	
29	VN107012	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0283	0,0089	0,1841	67,18	9,53	560,00	59	-485	Não Calc.	
15	E10764	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0177	0,0065	0,2333	85,15	12,07	560,00	46	-464	Não Calc.	
28	VN107014	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0258	0,0092	0,3672	134,03	19,01	560,00	29	-410	Não Calc.	
33	E16907	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0225	0,0080	0,1870	68,26	9,68	560,00	58	-483	Não Calc.	
16	E10769	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0255	0,0054	0,1350	49,28	6,99	560,00	80	-505	Não Calc.	
7	VN100121	450	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0290	0,0012	0,0853	31,12	4,41	560,00	127	-525	Não Calc.	
37	E12110	1000	1,0	24	9	7	2	5	4	0,0106	0,0022	0,0494	18,03	2,56	560,00	219	-540	Não Calc.	
35	E10679	1000	1,0	3	2	4	2	5	4	0,0096	0,0019	0,0385	14,05	1,99	560,00	281	-544	Não Calc.	
2	E10253	450	1,0	15	6	1	1	5	4	0,0170	0,0060	0,0533	19,47	2,76	560,00	203	-538	Não Calc.	
26	E14306	630	1,0	6	3	7	1	5	4	0,0130	0,0034	0,0418	15,26	2,16	560,00	259	-543	Não Calc.	
20	E17222	320	0,6	12	5	1	2	1	3	0,0164	0,0014	0,0615	22,43	3,18	560,00	176	-535	Não Calc.	
21	VN103037	320	1,0	12	5	1	2	1	3	0,0176	0,0025	0,0405	14,77	2,09	560,00	267	-543	Não Calc.	
5	VN100000	630	1,0	4	2	2	1	5	4	0,0066	0,0009	0,0087	3,17	0,45	560,00	1244	-556	Não Calc.	
3	E12940	450	1,0	12	5	1	1	4	3	0,0230	0,0010	0,0100	3,65	0,52	560,00	1082	-556	Não Calc.	
27	E17048	630	1,0	3	2	2	1	5	4	0,0131	0,0014	0,0097	3,56	0,50	560,00	1110	-556	Não Calc.	

Legenda:

(1) - Tipo de Edifício:
 1 - Habitação
 2 - Escritórios
 3 - Hospital
 4 - Shopping
 5 - Transporte
 6 - Indústria
 7 - Outros

(2) - Categoria de Utilização:
 1 - Muito baixa
 2 - Baixa
 3 - Média
 4 - Elevada
 5 - Muito elevada

(3) - Tecnologia de Tração:
 1 - Ascensor eléctrico
 2 - Ascensor hidráulico

(4) - Arquitectura Sistema:
 1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa central
 2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral
 3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1, indirecta
 4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral
 5 - Sem casa de máquinas, suspensão central
 6 - Pistão central
 7 - Sistema hidrocabo
 8 - Outros

(5) - Tipo de máquina:
 1 - Máquina com redutor de 1 velocidade
 2 - Máquina com redutor de 2 velocidades
 3 - Máquina com redutor e VVVF
 4 - Máquina sem redutor e VVVF
 5 - Válvulas hidráulicas controladas
 6 - Válvulas hidráulicas reguladas
 7 - Outros

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Exemplo de uma instalação

Como complemento ao estudo da hipótese 3 (Reinjecção no barramento DC), optou-se por estudar uma bateria quadruplex de ascensores instalados num edifício de escritórios com 21 pisos. Trata-se de um conjunto de ascensores que se inserem na categoria de utilização 4 da VDI 4707:2009.

Apresenta-se em seguida o projecto de instalação dos respectivos ascensores, bem como uma fotografia do edifício onde os ascensores se encontram instalados:

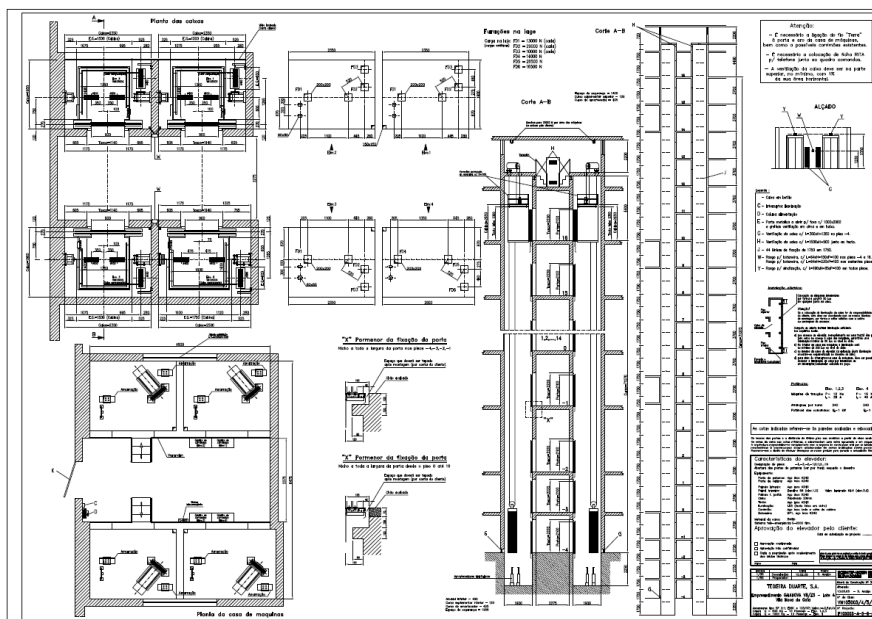


Figura 29 – Projecto de Instalação da bateria quadruplex

Fonte: Schmitt+Sohn Elevadores



Figura 30 – Fotografia do Edifício

Fonte: TD

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Os ascensores apresentam as características técnicas indicadas na tabela 13.

Tabela 13 – Características técnicas dos ascensores instalados no edifício Tower Plaza

Edifício Tower Plaza - Concept Offices

Local de Instalação: Vila Nova de Gaia - Portugal

Nº Obra	VN105003	VN105004	VN105005	VN105006
Nº Elevador	1	2	3	4
Carga Nominal (kg)	800	800	800	1000
Nº Passageiros	10	10	10	13
Velocidade nominal v (m/s)	2,5	2,5	2,5	2,5
Quantidade de pisos a servir	21	21	21	21
Quantidade de acessos	21 mesmo lado	21 mesmo lado	21 mesmo lado	21 mesmo lado
Curso (m)	72	72	72	72
Dimensões da caixa L x P (mm)	2350 x 1900	2350 x 1900	2350 x 1900	2500 x 1900
Dimensões da cabina L x P x A (mm)	1350 x 1400 x 2450	1350 x 1400 x 2450	1350 x 1400 x 2450	1600 x 1400 x 2450
Localização da casa das máquinas	em cima, na vertical	em cima, na vertical	em cima, na vertical	em cima, na vertical
Tensão de alimentação (V)	380	380	380	380
Número de manobras / horas	240	240	240	240
Portas de patamar: tipo	SZ2	SZ2	SZ2	SZ2
Portas de patamar: dimensões L x A (mm)	900 x 2100	900 x 2100	900 x 2100	900 x 2100
Condições ambientais da instalação	interior	interior	interior	interior
Características da máquina	sem redutor	sem redutor	sem redutor	sem redutor
Corrente nominal (A)	37,9	37,9	37,9	45,9
Corrente de arranque (A)	82,4	82,4	82,4	96,8
Potência nominal da máquina (kW)	11,9	11,9	11,9	14,9
Diâmetro da roda de tracção (mm)	500	500	500	500
Peso da cabina F (kg)	1600	1600	1600	1800
Peso do contrapeso G (kg)	2000	2000	2000	2300
Tipo de suspensão	2:1	2:1	2:1	2:1
Rendimento da caixa	82%	82%	82%	82%
Quantidade de rodas de desvio	3	3	3	3
Quantidade de cabos de tracção	4	4	4	4
Diâmetro dos cabos de tracção (mm)	10	10	10	10
Peso dos cabos de tracção (kg)	121	121	121	121
Peso do cabo de compensação (kg)	243	243	243	243

Fonte: Autor

Durante uma semana inteira (7 dias) foi realizada a medição do consumo total dos 4 ascensores. Esta medição foi efectuada à entrada do quadro da casa das máquinas que é comum aos quatro ascensores. Verificou-se antecipadamente que este quadro de entrada da casa das máquinas não está a alimentar quaisquer outras cargas que não os 4 ascensores.



Figura 31: Medição no quadro de entrada da casa de máquinas

Fonte: Autor

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Numa primeira fase pretendeu-se obter um valor de referência para o consumo energético num espaço de tempo alargado destes ascensores em situação de utilização real e sem que exista qualquer aproveitamento da energia recuperada. A energia obtida em modo gerador é dissipada completamente nas resistências de frenagem já instaladas em cada ascensor.

Este valor de referência será comparado posteriormente com os valores obtidos nas medições que serão realizadas quando se alterar a configuração do sistema, isto é, quando se aproveitar a energia recuperada.

Com a ajuda de um analisador de potência foi possível ao longo de uma semana obter o seguinte valor para a energia activa consumida pelos quatro ascensores: 440,8 kWh (conforme se pode verificar na figura 32). A medição decorreu entre o dia 02.04.2013 e o dia 09.04.2013.

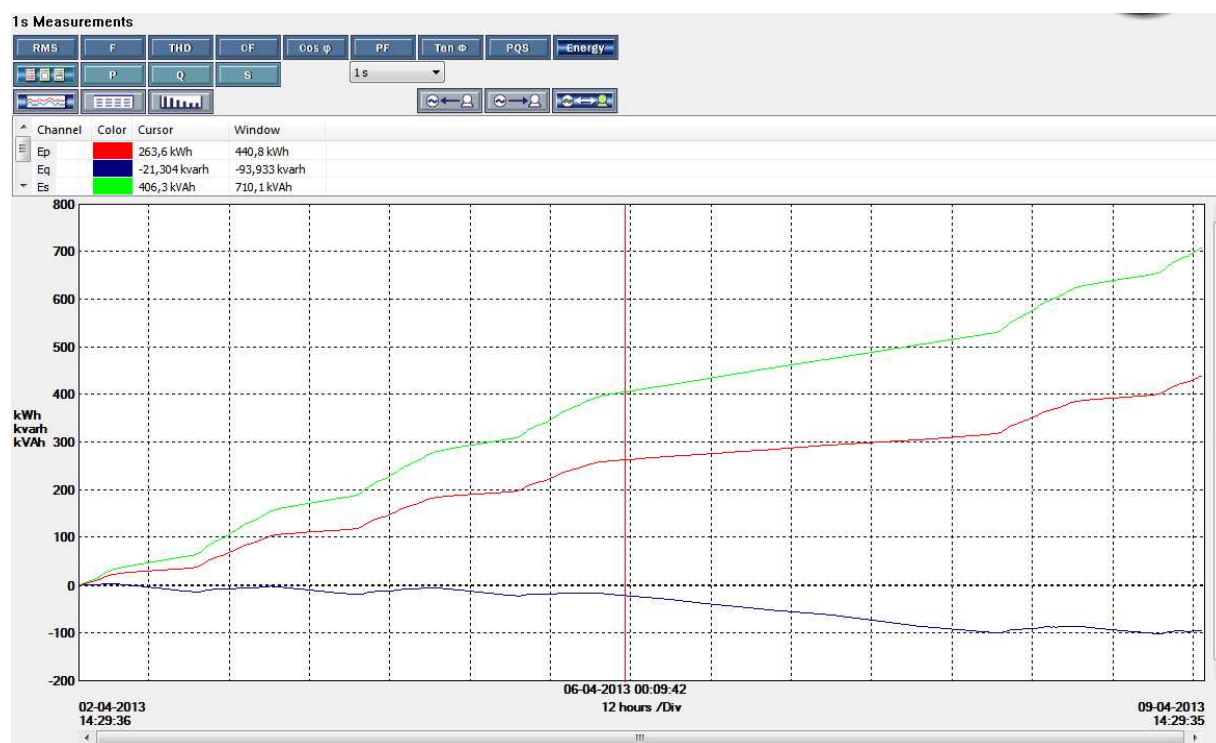


Figura 32 - Energia activa consumida pelos 4 ascensores ao longo de uma semana (sem recuperação)

Fonte: Autor

Em seguida procedeu-se à reconfiguração do sistema inicial interligando os barramentos DC dos 4 conversores electrónicos de frequência, com cabos especiais complementados com fusíveis especiais. De notar que se mantiveram as resistências de dissipação como

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

solução de último recurso, isto é, se por hipótese os quatro ascensores estivessem simultaneamente a operar em modo gerador, então a energia recuperada seria dissipada através da(s) resistência(s).

Durante mais uma semana (7 dias), procedeu-se à medição da energia eléctrica consumida pelos 4 ascensores, agora interligados pelos barramentos DC dos conversores. Com esta solução, a energia recuperada em qualquer um dos ascensores é disponibilizada a qualquer outro ascensor que se encontre em modo motor.

Esta medição foi efectuada à entrada do quadro da casa das máquinas que é comum aos quatro ascensores. Foram obtidos os seguintes valores: 431,1 kWh (conforme se pode verificar na figura 33). A medição decorreu entre o dia 10.07.2013 e o dia 17.07.2013.

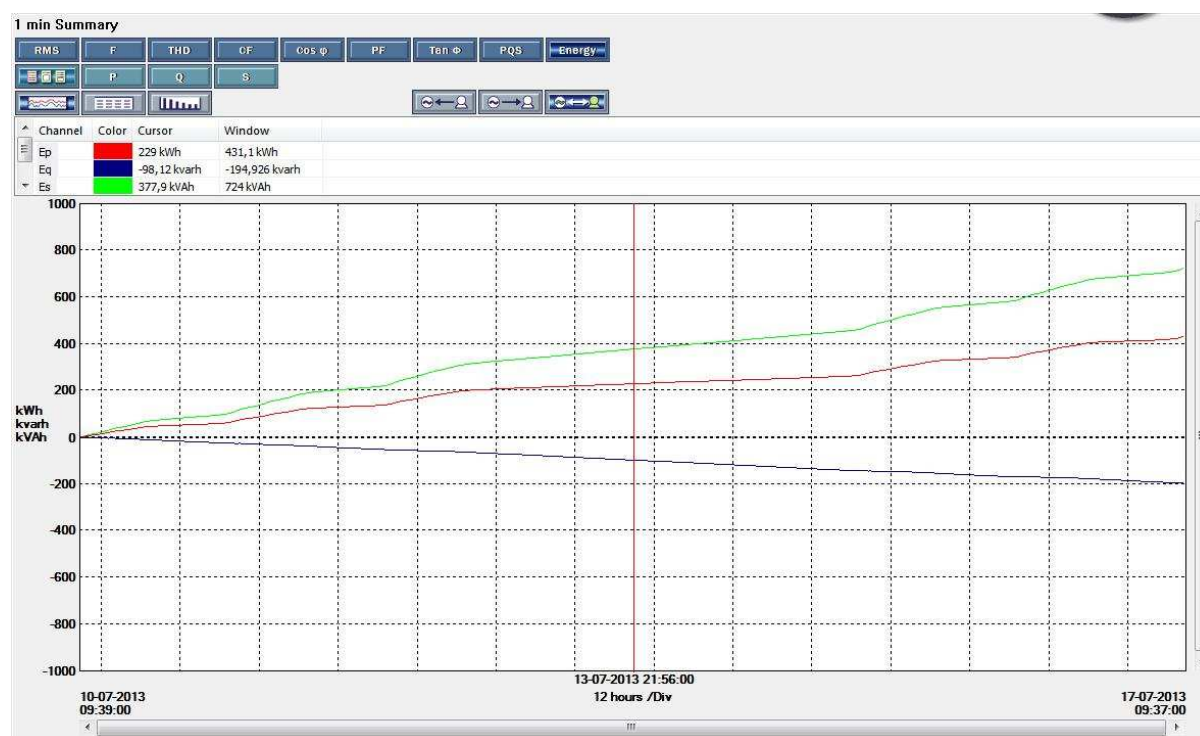


Figura 33 - Energia activa consumida pelos 4 ascensores ao longo de uma semana (com recuperação)

Fonte: Autor

Pode-se verificar que houve uma poupança no consumo de energia eléctrica, numa semana, de 9,7 kWh, ou seja cerca de 2,2 % face à solução inicial em que não se procedia à recuperação de qualquer energia. Anualizando, obter-se-ia uma poupança de 504 kWh.

Nota: com esta comparação pode incorrer-se num erro, que poderá resultar do facto de o padrão de tráfego na segunda semana poder ser diferente do padrão de tráfego que se verificou quando se realizou a primeira medição, isto é, com a configuração inicial do sistema de conversores. Por outro lado, nem toda a energia recuperada pode ser

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

reinjectada no barramento, pois os restantes ascensores também podem estar a funcionar em modo motor e na maior parte das situações a cabina raramente se desloca vazia, o que poderá alterar o balanço energético.

4.4 Hipótese 4: Reinjectão na rede eléctrica do edifício

Descrição da solução técnica:

Havendo um sistema de recuperação de energia e de reinjectão da energia eléctrica na rede do edifício, será possível obter um aumento do rendimento de todo o ascensor face a soluções em que a energia recuperada é dissipada na forma de energia calorífica na resistência de frenagem.

Normalmente o rectificador (1º componente do bloco de potência) de um conversor de frequência que não se destina à reinjectão de energia eléctrica na rede é composto apenas por díodos (rectificador não controlado), o que impossibilita tecnicamente a reinjectão de energia na rede. Se se substituir este rectificador de díodos por um rectificador com IGBTs com a técnica de comando PWM (*Pulse Width Modulation*), é possível assegurar um fluxo bidireccional da energia eléctrica, isto é, da rede de alimentação do edifício para o motor e do motor para a rede de alimentação do edifício. Desta forma será possível também controlar a forma da curva da corrente de entrada e o factor de potência.

Na grande maioria dos ascensores já instalados com conversores de frequência não é possível realizar a reinjectão da energia recuperada, porque o rectificador é unidireccional. Assim, para se obter um sistema completo de recuperação e de reinjectão de energia eléctrica são necessários pelo menos dois conversores de frequência, sendo um deles ligado ao motor e o outro à rede de alimentação do edifício.

Para garantir uma sincronização do conversor de frequência de reinjectão com a rede de alimentação do edifício não é necessário *hardware* suplementar. O conversor de frequência que se destina a fazer a reinjectão de energia na rede fornece corrente contínua controlada ao conversor de frequência que alimenta o motor. O conversor de reinjectão possibilita a alimentação e a reinjectão com correntes sinusoidais e com um factor de potência próximo de 1.

Para o dimensionamento de um sistema de reinjectão de energia eléctrica na rede têm de ser considerados os seguintes factores:

- a. a tensão de alimentação;
- b. corrente nominal, tensão nominal e o factor de potência do motor;
- c. potência de carga máxima e condições de sobrecarga.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O sistema de reinjecção de energia funcionará em perfeitas condições se as correntes nominais para a unidade de reinjecção e para a unidade de alimentação do motor forem idênticas. Deverá, contudo, ser garantido que também sob as condições mais desfavoráveis da rede, a potência total necessária possa ser absorvida ou reinjectada pela unidade de reinjecção de energia. Em configurações com várias unidades de alimentação de motores, a unidade de reinjecção terá de ter uma dimensão suficientemente grande para fornecer a potência máxima necessária, que será composta pela carga global de todas as unidades de alimentação de motores acrescida das perdas globais do sistema.

Se a unidade de reinjecção não fornecer a totalidade da potência necessária para todas as unidades de alimentação dos motores, haverá uma queda de tensão no barramento DC que interliga todas as unidades. Em situações extremas, tal pode conduzir à perda de sincronização com a rede de alimentação do edifício, ocorrendo uma desactivação de todo o sistema. Se por outro lado, a unidade de reinjecção não puder reinjectar a totalidade da potência fornecida pelas unidades de alimentação dos motores ao barramento intermédio, haverá igualmente uma desactivação de todo o sistema devido a uma sobretensão no barramento DC. (Control Techniques, 2007)

Será, assim, possível instalar um conversor para a reinjecção de energia que se pode adaptar a qualquer outro conversor electrónico de frequência já instalado que esteja a alimentar o motor do ascensor.

Como se irá ver, em sistemas com um único conversor de reinjecção e um conversor de alimentação do motor, a rede de alimentação é conectada através das ligações L1, L2 e L3 do conversor e o circuito de carregamento interno do conversor é utilizado para fazer o arranque do sistema. Já em sistemas com um ou mais conversores de reinjecção e vários conversores de alimentação do motor será necessário um circuito de carregamento externo devido à maior capacidade necessária resultante do elevado número de conversores. A rede de alimentação é interligada com um sistema especial de carregamento (o módulo SPMC)⁵⁷, que por sua vez carrega no arranque do sistema o barramento DC de todos os conversores do sistema. Quando o barramento estiver carregado o sistema SPMC é desligado.

⁵⁷ O módulo SPMC é um rectificador de tiristores controlados, que permite carregar os barramentos DC de todos os conversores do sistema integrado.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

São possíveis as seguintes configurações:

1. Sistema com um conversor de alimentação do motor e um conversor de reinjecção. Nesta configuração o conversor de reinjecção tem como função alimentar o conversor de alimentação do motor e reinjectar a energia recuperada na rede do edifício, quando o motor está a funcionar em modo gerador.

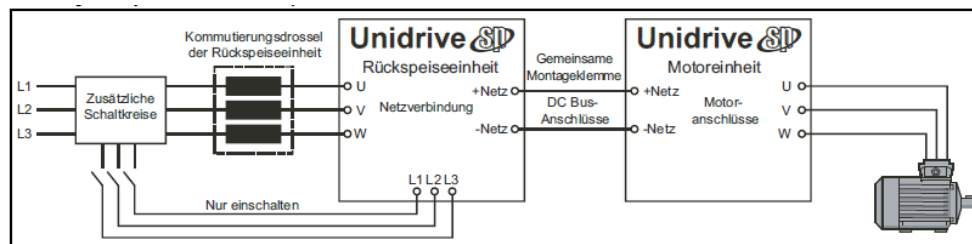


Figura 34 – Sistema com um conversor de alimentação e um de reinjecção

Fonte: Control Techniques, 2007

As ligações L1, L2 e L3 no conversor de reinjecção só são utilizadas quando se liga o sistema para carregar o sistema. Assim que os barramentos DC de ambos os conversores estiverem carregados, esta ligação é interrompida e é activado o inversor composto por IGBTs do conversor de reinjecção. Desta forma é possível o fluxo bidireccional da energia eléctrica. O módulo "Zusätzliche Schaltkreise" (ver também figuras 35, 36 e 37) permitirá realizar essa comutação.

2. Sistema com vários conversores de alimentação de motor e um único conversor de reinjecção. Nesta configuração o conversor de reinjecção tem de ser dimensionado por forma a poder fornecer a potência total necessária para todos os conversores de alimentação dos diversos motores.

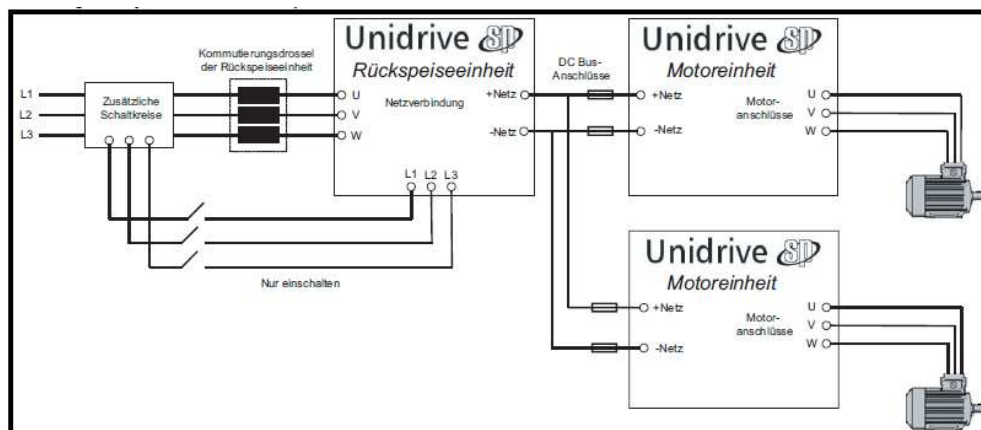


Figura 35 – Sistema com dois conversores de alimentação e um de reinjecção

Fonte: Control Techniques, 2007

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Na fase de arranque do sistema são igualmente utilizadas as ligações L1, L2 e L3 no conversor de reinjecção até os barramentos DC de todos os conversores estarem carregados. Esta ligação é então interrompida e é activado o inversor composto por IGBTs do conversor de reinjecção, como na solução anterior.

Se se pretender instalar um número maior de conversores de alimentação de motor a um único conversor de reinjecção, poderá ser necessário instalar um circuito adicional de carga dos barramentos DC (o sistema SPMC), por forma a garantir a capacidade necessária para o sistema poder arrancar.

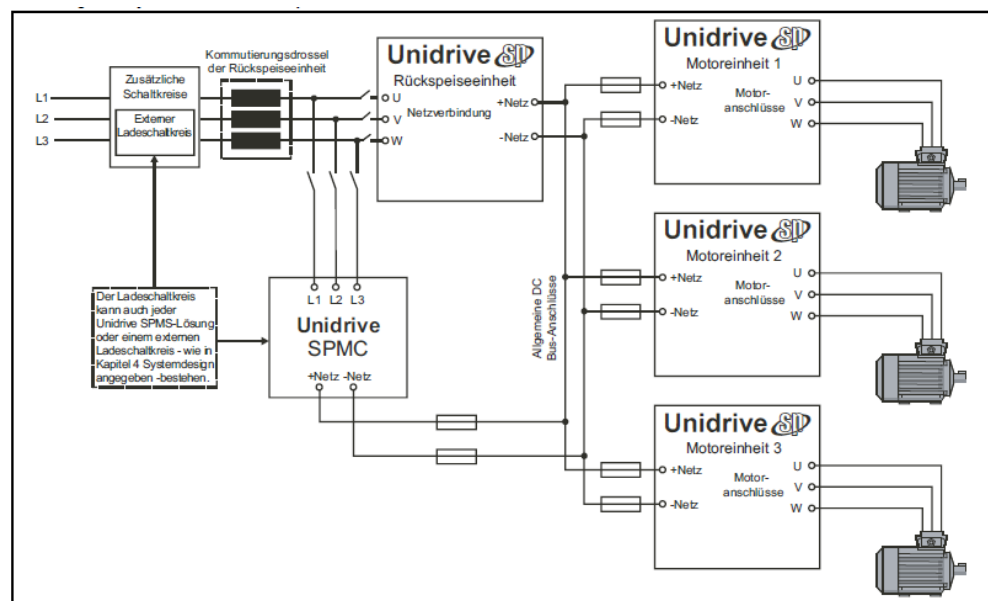


Figura 36 – Sistema com vários conversores de alimentação e um de reinjecção

Fonte: Control Techniques, 2007

3. Sistema com vários conversores de alimentação de motor e com vários conversores de reinjecção. Para esta configuração os conversores de reinjecção deverão ser dimensionados por forma a poderem disponibilizar toda a potência necessária a todos os conversores de alimentação de motor. Dever-se-á ter em atenção o dimensionamento dos sistemas de protecção.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

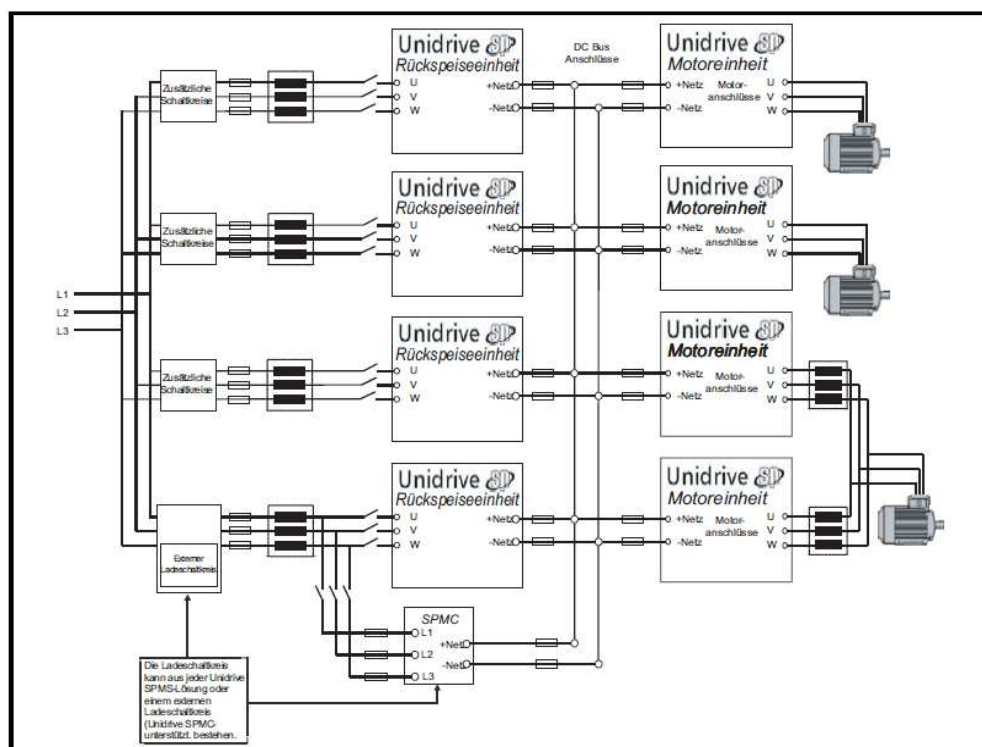


Figura 37 – Sistema com vários conversores de alimentação e de reinjecção

Fonte: Control Techniques, 2007

Vantagens e desvantagens da solução:

Esta solução permite as seguintes vantagens:

- + Poupança de energia mediante a menor necessidade de energia da rede de alimentação;
- + A curva da corrente de entrada é sinusoidal;
- + Fácil sincronização com a rede de alimentação;
- + Fácil interligação dos barramentos DC dos diferentes conversores através das saídas / entradas já existentes;
- + Pode ser utilizado em edifícios onde só existe um único elevador instalado.

Como desvantagens podem referir-se:

- + Necessidade de instalação de pelo menos um conversor adicional para reinjectar a energia na rede do edifício, com todos os custos associados;
- + Acautelar a sincronização com a rede de alimentação do edifício;
- + Injecção de potenciais perturbações na rede de alimentação do edifício;
- + Necessidade de instalação de um sistema equilibrado de protecções, com fusíveis especiais.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Custos / investimento:

Em função da potência da máquina instalada (que resulta da carga nominal e da velocidade do ascensor), terão de ser previstos conversores de frequência adequados para a reinjecção, incluindo o sistema de protecções e respectivas cablagens. O seu custo será de:

Para ascensores de 300 kg	2000 Euros
Para ascensores de 450 kg	2000 Euros
Para ascensores de 630 kg	2000 Euros
Para ascensores de 1.000 kg	2100 Euros
Para ascensores de 1.250 kg	2100 Euros
Para ascensores de 1.600 kg	2350 Euros
Para ascensores de 2.000 kg	2350 Euros
Para ascensores > 2.000 kg	2950 Euros

Avaliação do investimento:

Com base nas medições realizadas, calculou-se para cada um dos ascensores medidos, e aplicando a metodologia definida, a energia recuperada ao longo de um ano.

Pressupostos:

1. é possível reinjectar toda a energia recuperada pelo sistema de ascensores na rede eléctrica do edifício;
2. para o cálculo tomou-se por base o tempo médio de manobra por dia definido pela norma VDI 4707:2009.

A energia reinjectada na rede eléctrica do edifício é a energia que não será necessário comprar à rede pública para alimentar outras cargas do edifício, pelo que será esse o benefício que se obtém com esta solução.

O *cash-flow* anual será então dado pela energia não comprada à rede pública multiplicada pelo preço de compra de cada kWh à rede eléctrica pública.

Com base nos *cash-flows* de exploração calculados e no *cash-flow* de investimento, é calculado o VAL, a TIR e o PRA. Apresentam-se na tabela 14 os resultados obtidos para cada um dos ascensores da amostra.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Conclusões:

A partir dos dados obtidos com as medições realizadas em todos os ascensores da amostra é possível apresentar as seguintes conclusões:

1. Dos 39 ascensores da amostra, apenas 3 apresentam um valor actual líquido (VAL) positivo, recomendando-se por isso que nesses ascensores o investimento de reinjecção da energia recuperada na rede eléctrica do edifício seja realizado. Estes 3 ascensores apresentam um curso elevado (40 m e mais) e pertencem às categorias de utilização mais elevadas (4 e 5). Ainda assim, para estes 3 ascensores, o período de recuperação do investimento nunca será inferior a 3 anos (superior à solução preconizada na hipótese 4)
2. Para os restantes ascensores não se justificará realizar o investimento. O prazo de recuperação do investimento em 33 ascensores será sempre superior a 20 anos (ou seja superior à vida útil do próprio ascensor). A energia anualmente recuperada por estes equipamentos e reinjectável será sempre inferior a 1000 kWh. Perante um investimento mínimo de 2000 Euros, o ascensor deveria permitir uma recuperação de energia eléctrica anual mínima de 1410 kWh (ao longo de 10 anos) por forma a justificar o investimento.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 14 – Resultados da Hipótese 4: Reinjeção na rede eléctrica do edifício

Tabela de Medições e de Resultados - Hipótese 4: Reinjeção na rede eléctrica do edifício																			
Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Número de Pisos	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Arquitectura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Energia diária modo gerador [kWh]	Energia recuperada anual [kWh]	Valor poupado anualmente [€]	Valor do investimento [€]	Período de Recuperação Actualizado (PRA) [Anos]	Valor Actual Líquido (VAL) [€]	Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) [%]	
9	E11478	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1230	0,0489	9,7800	3569,70	506,18	2350,00	5	1657	17%	
1	VN105003	900	2,5	72	21	2	4	3	4	0,1430	0,0740	11,7529	4289,92	608,30	2100,00	3	2716	26%	
8	E11477	1600	1,6	40	11	3	5	1	3	0,1227	0,0488	14,4306	5267,16	746,88	2350,00	3	3563	29%	
12	E12730	1600	1,0	28	8	3	4	1	3	0,1235	0,0280	2,4378	889,81	126,18	2350,00	19	-1351	-10%	
11	E12727	1000	1,0	24	7	3	4	1	3	0,0880	0,0170	3,9913	1456,83	206,58	2100,00	10	-485	0%	
6	VN100120	750	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0959	0,0387	2,2471	820,19	116,30	2100,00	18	-1179	-10%	
10	E10458	1600	1,0	12	4	3	4	5	4	0,0539	0,0162	1,8059	659,17	93,47	2350,00	25	-1610	-14%	
23	E13608	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0344	0,0116	0,5643	205,98	29,21	2000,00	68	-1769	Não Calc.	
17	VN199110	450	1,6	45	16	1	3	1	3	0,0537	0,0128	0,6480	236,52	33,54	2000,00	60	-1734	Não Calc.	
4	VA197004	630	1,0	42	15	2	4	1	3	0,0600	0,0110	1,8000	657,00	93,16	2000,00	21	-1262	-12%	
24	VN1-45P1	450	1,0	30	11	2	4	1	3	0,0397	0,0095	1,1400	416,10	59,00	2000,00	34	-1533	Não Calc.	
36	E15958	630	1,0	27	9	2	3	5	4	0,0712	0,0158	0,7623	278,23	39,45	2000,00	51	-1688	Não Calc.	
22	E13607	630	1,0	21	8	7	3	5	4	0,0456	0,0144	1,0800	394,20	55,90	2000,00	36	-1557	Não Calc.	
18	VN199111	800	1,0	45	16	1	3	1	3	0,0761	0,0159	0,8944	326,45	46,29	2100,00	45	-1734	Não Calc.	
14	E11823	450	1,0	30	11	1	3	5	4	0,0505	0,0110	0,9281	338,77	48,04	2000,00	42	-1620	Não Calc.	
13	E12734	450	1,0	8	3	3	4	1	3	0,0159	0,0051	0,7443	271,68	38,52	2000,00	52	-1695	Não Calc.	
32	E16902	630	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0417	0,0127	0,2219	81,01	11,49	2000,00	174	-1909	Não Calc.	
19	E11341	630	1,0	18	7	7	2	5	4	0,0362	0,0110	0,1424	51,99	7,37	2000,00	271	-1942	Não Calc.	
30	VN107016	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0257	0,0089	0,2218	80,96	11,48	2000,00	174	-1909	Não Calc.	
33	E16907	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0225	0,0080	0,1946	71,03	10,07	2000,00	199	-1920	Não Calc.	
15	E10764	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0177	0,0065	0,1598	58,32	8,27	2000,00	242	-1935	Não Calc.	
25	VN1-45P4	300	1,0	27	10	2	4	1	3	0,0234	0,0023	0,2549	93,06	13,20	2000,00	152	-1896	Não Calc.	
28	VN107014	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0258	0,0092	0,1669	60,92	8,64	2000,00	232	-1932	Não Calc.	
31	E14061	450	1,0	24	9	1	2	5	4	0,0262	0,0093	0,1361	49,68	7,04	2000,00	264	-1944	Não Calc.	
29	VN107012	450	1,0	18	7	1	2	5	4	0,0283	0,0089	0,1841	67,18	9,53	2000,00	210	-1925	Não Calc.	
16	E10769	450	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0255	0,0054	0,1944	70,96	10,06	2000,00	199	-1920	Não Calc.	
38	VN106072	630	1,0	15	6	1	2	5	4	0,0226	0,0069	0,2772	101,18	14,35	2000,00	139	-1886	Não Calc.	
34	E13949	630	1,0	12	5	2	2	5	4	0,0247	0,0077	0,1802	65,79	9,33	2000,00	214	-1926	Não Calc.	
7	VN100121	450	1,6	42	15	1	3	1	3	0,0290	0,0012	0,0900	32,85	4,86	2000,00	429	-1963	Não Calc.	
21	VN103037	320	1,0	12	5	1	2	1	3	0,0176	0,0025	0,0602	21,96	3,11	2000,00	642	-1975	Não Calc.	
2	E10253	450	1,0	15	6	1	1	5	4	0,0170	0,0060	0,0547	19,96	2,83	2000,00	707	-1978	Não Calc.	
20	E17222	320	0,6	12	5	1	2	1	3	0,0164	0,0014	0,0290	10,57	1,50	2000,00	1334	-1988	Não Calc.	
26	E14306	630	1,0	6	3	7	1	5	4	0,0130	0,0034	0,0304	11,11	1,58	2000,00	1269	-1988	Não Calc.	
3	E12940	450	1,0	12	5	1	1	4	3	0,0230	0,0010	0,0122	4,45	0,63	2000,00	3167	-1995	Não Calc.	
27	E17048	630	1,0	3	2	2	1	5	4	0,0131	0,0014	0,0247	9,02	1,28	2000,00	1563	-1990	Não Calc.	
5	VN100000	630	1,0	4	2	2	1	5	4	0,0066	0,0009	0,0059	2,16	0,31	2000,00	6521	-1998	Não Calc.	
37	E12110	1000	1,0	24	9	7	2	5	4	0,0106	0,0022	0,0507	18,50	2,62	2100,00	801	-2079	Não Calc.	
35	E10679	1000	1,0	3	2	4	2	5	4	0,0096	0,0019	0,0465	16,97	2,41	2100,00	873	-2081	Não Calc.	
39	VN106073	1600	1,0	12	5	7	2	5	4	0,0574	0,0152	0,2626	95,83	13,59	2350,00	173	-2242	Não Calc.	

Legenda:

(1) - Tipo de Edifício:	(2) - Categoria de Utilização:	(3) - Tecnologia de Tração:	(4) - Arquitectura Sistema:	(5) - Tipo de máquina:
1 - Habitação	1 - Muito baixa	1 - Ascensor eléctrico	1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa central	1 - Máquina com redutor de 1 velocidade
2 - Escritórios	2 - Baixa	2 - Ascensor hidráulico	2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral	2 - Máquina com redutor de 2 velocidades
3 - Hospital	3 - Média		3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1, indirecta	3 - Máquina com redutor e VVVV
4 - Shopping	4 - Elevada		4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral	4 - Máquina sem redutor e VVVV
5 - Transporte	5 - Muito elevada		5 - Sem casa de máquinas, suspensão central	5 - Válvulas hidráulicas controladas
6 - Indústria			6 - Pistão central	6 - Válvulas hidráulicas reguladas
7 - Outros			7 - Sistema hidrocaço	7 - Outros
			8 - Outros	

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Exemplo 1 de uma instalação:

Tomando como base de comparação os mesmos 4 ascensores da hipótese de trabalho anterior (ver ponto 4.3), procedeu-se à instalação na casa de máquinas dos 4 ascensores em estudo, de uma armário adicional que contém o conversor electrónico de frequência que se destina à reinjecção na rede. Foi executado o seguinte sistema:

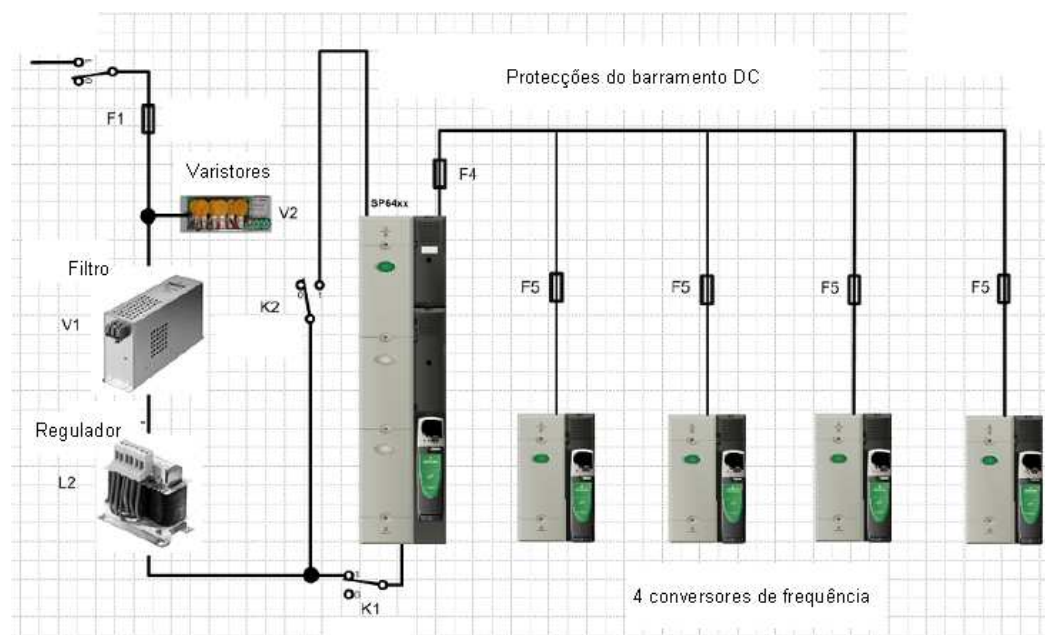


Figura 38 – Esquema de instalação do sistema para 4 ascensores

Fonte: Control Techniques, 2011

Os quatro conversores de alimentação dos 4 motores foram interligados com o conversor de reinjecção através das saídas / entradas dos barramentos DC. Foram igualmente instaladas as protecções adequadas (calculadas em função da energia em jogo no sistema).

Procedeu-se novamente à medição do consumo de energia eléctrica dos 4 ascensores durante uma semana. Esta medição foi realizada à entrada do quadro da casa das máquinas que é comum aos quatro ascensores.

O consumo dos 4 ascensores foi de 368,28 kWh, no espaço de uma semana. Ou seja, a instalação de um sistema de recuperação e de reinjecção de energia permitirá, durante uma semana, gerar uma poupança da energia eléctrica fornecida pela rede de 16,4 %, face à solução inicial sem qualquer sistema de recuperação de energia.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

De notar que nesta análise não se procedeu a uma extrapolação do valor de consumo anual (conforme prescrito na norma VDI 4707:2009), mas antes a uma comparação dos valores de consumo em períodos de uma semana, incorrendo-se eventualmente num erro, dado que o padrão de funcionamento do ascensor pode variar de semana para semana. Anualizando, obter-se-ia uma poupança de 3771 kWh, para os 4 ascensores.

Para a implementação desta solução foi necessário um investimento de 3500 euros, para o fornecimento de um quadro, de um conversor de frequência e de todos os sistemas auxiliares de protecção, o que conduziria a um período de recuperação actualizado de 7 anos.

Exemplo 2 de uma instalação:

Como complemento, pretendeu-se exemplificar a instalação de um sistema de reinjecção de energia eléctrica num ascensor que serve poucos pisos e que não esteja interligado em grupo.

Optou-se por estudar um ascensor eléctrico de roda de aderência com máquina sem redutor e com motor síncrono, de 2 pisos, para uma carga nominal de 630 kg e com uma velocidade nominal de 1,0 m/s instalado no edifício da Schmitt-Elevadores, Lda. Mediu-se o seu consumo energético total durante o período de uma semana (7 dias) e foi obtido um valor de 33,4 kWh. Procedeu-se em seguida à instalação de um segundo conversor de frequência que possibilitará a reinjecção da energia recuperada na rede eléctrica do edifício, conforme o esquema apresentado na figura 39.

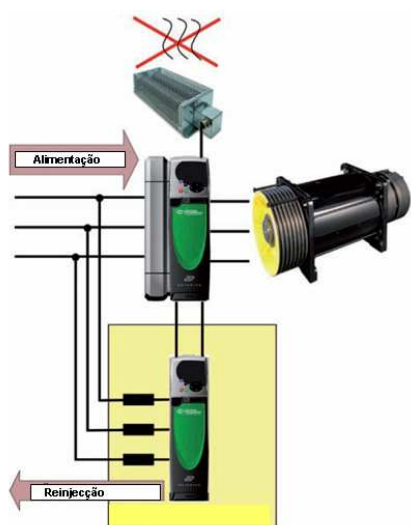


Figura 39 – Esquema de instalação conversor: 1 ascensor
Fonte: Control Techniques, 2012



Figura 40 – Aspecto do armário de reinjecção
Fonte: Control Techniques, 2012

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Realizou-se então uma nova medição do consumo energético durante um novo período de 7 dias, tendo-se obtido o seguinte resultado: 28,79 kWh, ou seja verificou-se uma redução de 4,64 kWh, o que corresponde a uma poupança de 13,8 %.

Não será possível extrapolar estes resultados porque com esta comparação se pode estar a incorrer num erro, que poderá resultar do facto de o padrão de tráfego na segunda semana (no segundo período de 7 dias) poder ser diferente do padrão de tráfego que se verificou quando se realizou a primeira medição, isto é, com a configuração inicial.

4.5 Hipótese 5: Reinjecção na rede eléctrica pública

A reinjecção de energia eléctrica directamente na rede pública implicará uma configuração idêntica à descrita no ponto anterior, isto é, será sempre necessário instalar um ou mais conversores de reinjecção para canalizar a energia recuperada dos ascensores para a rede pública.

Existirão, contudo diversas dificuldades que terão de ser acauteladas. Desde logo a autorização por parte do fornecedor público de energia eléctrica e as eventuais consequências que a reinjecção da energia eléctrica possa ter sobre a rede pública.

Alguns equipamentos podem provocar perturbações no sistema público de distribuição de energia eléctrica, como por exemplo os motores dos ascensores (estes podem originar quedas de tensão devido a correntes de irrupção no arranque) e os conversores electrónicos de frequência, que podem provocar uma distorção harmónica. Esta última resulta da distorção da corrente e da tensão sinusoidais devido às correntes harmónicas absorvidas pelas cargas não lineares, podendo implicar o sobredimensionamento dos equipamentos, o aumento da temperatura, fenómenos de ressonância com condensadores e/ou a eventual destruição de equipamentos (nomeadamente de transformadores).

Relativamente à necessidade de se ter autorização para reinjectar energia eléctrica na rede pública (podendo gerar uma receita com a venda da mesma), importa analisar o que está actualmente regulamentado em Portugal.

Assim, o Decreto-Lei nº 29/2006 de 15 de Fevereiro, alterado pelo Decreto-Lei nº 215-A/2012 de 8 de Outubro, estabelece as bases gerais aplicáveis ao exercício das actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Segundo este documento, o exercício da actividade de produção de electricidade é livre, ficando sujeito à obtenção de licença ou, nos casos previstos em legislação complementar, à realização de comunicação prévia junto das entidades administrativas competentes.

A produção de electricidade pode ser classificada em:

- a. Produção em regime ordinário, isto é, a actividade de produção que não esteja abrangida por um regime jurídico especial;
- b. Produção em regime especial, isto é, a actividade de produção sujeita a regimes jurídicos especiais, tais como a produção de electricidade através da cogeração e de recursos endógenos, renováveis e não renováveis, a microprodução, a miniprodução e a produção sem injeção de potência na rede, bem como a produção de electricidade através de recursos endógenos, renováveis e não renováveis, não sujeita a regime jurídico especial.

Este documento estabelece ainda que a ligação das instalações de produção à rede de distribuição em baixa tensão deve ser efectuada em condições técnica e economicamente adequadas, nos termos estabelecidos no Regulamento de Relações Comerciais, no Regulamento da Rede de Distribuição, no Regulamento de Operação das Redes e no Regulamento da Qualidade de Serviço. A ligação à rede dos centros electroprodutores em regime especial efectua-se nos termos estabelecidos em legislação complementar.

Impõem-se ainda que os clientes devem manter em condições de segurança as suas instalações e equipamentos, nos termos das disposições legais aplicáveis, e evitar que as mesmas introduzam perturbações fora dos limites estabelecidos regulamentarmente nas redes a que se encontram ligados.

Por sua vez o Decreto-Lei nº 172/2006 de 23 de Agosto alterado pelo Decreto-Lei nº 215-B/2012 de 8 de Outubro, estabelece o regime jurídico aplicável às actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade bem como os procedimentos aplicáveis ao acesso àquelas actividades. Excluem-se do âmbito de aplicação desta norma legal a produção de electricidade em cogeração, a microprodução e miniprodução e a produção de electricidade a partir da energia das ondas na zona-piloto, e ainda a produção de electricidade a partir de energia nuclear.

O exercício da actividade de produção de electricidade em regime ordinário é livre, ficando sujeito à obtenção de licença de produção a atribuir pela entidade licenciadora, a solicitação do interessado.

Este documento fixa no seu artigo 6º os critérios de atribuição de uma licença de produção.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Por sua vez o exercício da actividade de produção de electricidade em regime especial é livre, ficando sujeito a controlo prévio. Este controlo prévio é exercido mediante a atribuição de uma licença de produção, a requerimento do interessado (para potências de ligação à rede superior a 1 MVA, para centros electroprodutores sujeitos aos regimes jurídicos de avaliação de impacte ambiental, para o regime de remuneração garantida), ou através da realização, por este, de uma comunicação prévia para a instalação de um centro electroprodutor (nos restantes casos).

Mas esta norma legal refere ainda que a atribuição de licença de produção ou a admissão da comunicação prévia dependem da conformidade do projecto com os objectivos e prioridades da política energética, tendo em conta, entre outros, os seguintes requisitos:

- a. a existência de condições de ligação quanto à capacidade de recepção da rede pública no ponto de injeção pretendido
- b. a segurança e a fiabilidade das instalações e do equipamento associado, nos termos previstos no Regulamento da Rede de Transporte, no Regulamento da Rede de Distribuição e no Regulamento de Operação de Redes.

A última versão deste Decreto-Lei estabelece ainda que os regimes remuneratórios para a actividade de produção de electricidade em regime especial, podem ser:

- a. Regime geral, em que os produtores vendem a electricidade produzida nos termos aplicáveis à produção em regime ordinário, em mercados organizados ou através da celebração de contratos bilaterais com clientes finais ou com comercializadores de electricidade. Para poder exercer a actividade de produção ao abrigo deste regime, o produtor depende apenas da obtenção da licença de produção ou da admissão da comunicação prévia, bem como da respectiva licença ou respectivo certificado de exploração.
- b. Regime de remuneração garantida, em que a electricidade produzida é entregue ao comercializador de último recurso. O exercício da actividade de produção neste regime depende, previamente à obtenção da licença de produção e respectiva licença de exploração, da atribuição de reserva de capacidade de injeção na Rede Eléctrica de Serviço Público.

O titular de licença de produção ou do acto de admissão da comunicação prévia só pode iniciar a exploração industrial do centro electroprodutor após a obtenção da licença de exploração ou do certificado de exploração, consoante o caso.

O Regulamento da Rede de Transporte e o Regulamento da Rede de Distribuição foram aprovados pela Portaria nº 596/2010 de 30 de Julho. O Regulamento da Rede de

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Distribuição estabelece as condições técnicas de exploração da Rede nacional de Distribuição de Electricidade em Alta e Média Tensão (RND) e das Redes de Distribuição de Electricidade em Baixa Tensão (RDBT), afectas à Rede Eléctrica de Serviço Público (RESP). Os operadores das redes de distribuição definem, caso a caso, as condições técnicas de ligação de instalações às respectivas redes. Esta ligação pressupõe o cumprimento das normas legais e regulamentares em vigor, não podendo prejudicar a normal exploração das redes e devendo obedecer aos regulamentos de segurança em vigor, de modo a não constituir perigo para pessoas e bens. Os elementos de ligação das instalações à rede devem ser executados de acordo com as especificações de projecto e de construção indicadas pelos respectivos operadores. Estes têm a faculdade de aprovar previamente os materiais a utilizar.

Para a ligação de instalações de produção à rede devem ser tidas em conta as seguintes condições:

1. o produtor deve equipar a sua instalação de produção com protecções ao nível da interligação, que assegurem a separação rápida e automática da rede. O aparelho de corte da interligação deve interromper todos os condutores activos;
2. o produtor não pode efectuar a ligação da instalação de produção à rede quando esta se encontra fora de tensão;
3. a queda de tensão transitória na rede devida à ligação de geradores assíncronos não deve ser superior a 5%;
4. a ligação de geradores síncronos só pode ser feita quando a tensão, a frequência e a fase do gerador a ligar estiverem compreendidas entre os seguintes limites:
 - i. tensão de serviço (tensão da rede p.u.): de 0,9 a 1,1
 - ii. desvio da frequência da rede: $\pm 0,3$ Hz
 - iii. Fase (em relação à tensão da rede): $\pm 20\%$

Consideram-se equiparáveis a geradores síncronos os geradores equipados com sistema do tipo alternador / rectificador / inversor, com velocidade variável e controlo de tensão e de factor de potência.

Por sua vez, o Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS), aprovado pelo Despacho nº 5255/2006 de 8 de Março, estabelece os padrões mínimos de qualidade, de natureza técnica (aspectos de continuidade de serviço e de qualidade da onda de tensão – características de amplitude, de frequência, de forma de onda de tensão e de simetria do sistema trifásico) e comercial, a que deve obedecer o serviço prestado pelas entidades do sistema eléctrico nacional. Neste documento legal refere-se que os produtores devem

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

garantir que as suas instalações não introduzam perturbações na rede que excedam os limites de emissão definidos no regulamento relativamente às características da tensão. Estas passam pela frequência, pelo valor eficaz da tensão, pelas cavas de tensão (diminuição brusca da tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 1% da tensão declarada, seguida do restabelecimento da tensão depois de um curto lapso de tempo – 10 ms a 1 minuto), pela tremulação (ou *flicker*, uma impressão de instabilidade da sensação visual provocada por um estímulo luminoso, cuja luminância ou repartição espectral flutua no tempo), pelo desequilíbrio do sistema trifásico de tensões (estado no qual os valores eficazes das tensões das fases ou das defasagens entre tensões de fases consecutivas, num sistema trifásico, não são iguais) e pela distorção harmónica (deformação da onda de tensão ou de corrente sinusoidal à frequência industrial provocada por cargas não lineares). O operador de rede pode interromper a ligação a uma instalação quando o produtor não limite as perturbações emitidas nos prazos definidos no RQS, particularmente em situações que ponham em causa a segurança de equipamentos pertencentes a outras instalações ou das redes eléctricas.

Atenda-se ao Decreto-Lei nº 363/2007 de 2 de Novembro, alterado pelo Decreto-Lei nº 118-A/2010 de 25 de Outubro, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de energia eléctrica por intermédio de instalações de pequena potência (ou unidades de microprodução).

Este Decreto-Lei aplica-se à microprodução de electricidade e calor, ainda que não renovável, mediante a utilização de uma unidade ou instalação monofásica ou trifásica, em baixa tensão, com uma potência de ligação até 5,75 kW (e que poderá ir até aos 11,04 kW nos condomínios que integrem 6 ou mais fracções).

Esta norma legal define que o acesso à actividade de produção de electricidade por intermédio de unidades de microprodução está sujeito a registo e a uma subsequente obtenção de certificado de exploração da respectiva instalação.

O produtor deve ainda entregar a totalidade da electricidade produzida, líquida do consumo dos serviços auxiliares, à rede pública de distribuição em baixa tensão, bem como suportar os custos de ligação e o respectivo contador de venda. Igualmente deverá ser titular de um contrato de compra e venda de energia eléctrica em baixa tensão celebrado com um comercializador.

O Decreto-Lei nº 34/2011 de 8 de Março estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade a partir de recursos renováveis, por intermédio de unidades de

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

miniprodução. Entende-se por unidade de miniprodução a instalação de produção de electricidade, a partir de energias renováveis, baseada em uma só tecnologia de produção cuja potência de ligação à rede seja igual ou inferior a 250 kW. Não são abrangidas por esta norma legal a produção de electricidade através de unidades de microprodução, a produção em cogeração e a produção de electricidade no âmbito realização de projectos de inovação e demonstração de conceito. O acesso à actividade de miniprodução de electricidade está sujeito a registo e subsequente obtenção de certificado de exploração da instalação.

De referir que a solução da reinjecção na rede eléctrica da energia recuperada em ascensores não é explicitamente referida na legislação portuguesa. Assume-se, pelo exposto atrás, que não é possível uma interligação directamente à rede pública em Portugal sem a obtenção de uma licença ou de uma autorização prévia.

Uma vez que não existe qualquer regulamentação específica, nem a definição de qualquer valor de aquisição de energia eléctrica por parte da rede pública, optou-se por não estudar esta hipótese especificamente do ponto de vista económico-financeiro, remetendo-se para a avaliação técnica e económico-financeira já realizada na hipótese 4 (ver ponto 4.4). Essa hipótese será muito idêntica à que se conseguiria com a presente solução a menos dos custos decorrentes de eventuais licenciamentos, da instalação de protecções adicionais e dos respectivos contadores de energia eléctrica que terão de ser instalados para o efeito.

Optou-se, ainda assim, por apresentar esta hipótese, dado que no futuro esta solução pode vir a ser considerada no quadro jurídico português.

5. Desenvolvimento de um simulador de cálculo

5.1 Introdução

A partir dos dados obtidos com as medições de diferentes ascensores, bem como dos cálculos de consumos energéticos executados com base no modelo físico apresentado e dos procedimentos definidos na norma VDI 4707:2009, foi desenvolvido um simulador que:

1. permite calcular o consumo energético anual esperado de um dado ascensor, após introdução dos dados base referentes a esse ascensor pelo utilizador;
2. permite apresentar sugestões de utilização da energia recuperada, e dessa forma contribuir para melhorar a eficiência energética do ascensor, tendo em conta os aspectos técnicos e os aspectos económico-financeiros.

5.2 Desenvolvimento do simulador

O simulador foi construído em *Microsoft Excel*, pretendendo ser uma ferramenta de fácil utilização pelos colaboradores e clientes da Schmitt-Elevadores, Lda⁵⁸.

O simulador está estruturado da seguinte forma:

1. Input:

Dados Gerais do Ascensor

Carga nominal da cabina (EN81)	m_{cabina}	1000	(kg)
Peso da cabina	m_{cabina}	1600	(kg)
Peso do contrapeso	$m_{contrapeso}$	2000	(kg)
Velocidade nominal	v	2.5	(m/s)
Curso	H	72	(m)

Dados para a Avaliação Económico-financeira

Investimento inicial	I	1000	(€)
Vida útil do investimento	n	10	(anos)
Taxa de actualização	i	4.49%	
Custo da energia		0,1418	(€/kWh)

Relatório

Sistema de Tracção

Aceleração	a	1,85	(m/s^2)
Inércia do motor	J_{motor}	0,75	($kg \cdot m^2$)
Inércia do sistema	$J_{sistema}$	80,2	($kg \cdot m^2$)
Raio da roda de tracção	r	0,5	(m)
Tipo de suspensão		2:1	
Potência motor (chapa características do motor)		11,9	(kW)
Consumo em modo motor medido - uma viagem		0,143	(kWh)
Consumo em modo gerador medido - uma viagem		0,074	(kWh)

Outros Dados

Número de manobras por hora		0	
Número de manobras por dia		0	
Número de dias por ano		365	(dias/ano)
Possibilidade de configuração com outro ascensor		Sim	
Ascensor dotado de conversor electrónico de frequência		Sim	
Categoria de utilização segundo VDI 4707:2009		4	
Capacidade da bateria		0,408	(kWh)
Capacidade do supercondensador		0,053	(kWh)

Rendimentos

Rendimento do motor	η_{motor}	90%	
Rendimento da cabina	η_{cabina}	90%	
Rendimento do redutor	$\eta_{redutor}$	90%	
Rendimento do conversor de frequência	$\eta_{conversor}$	90%	
Rendimento total	η_{total}	66%	

Hipóteses Técnicas a Considerar

Bateria: alimentação dos circuitos em <i>stand-by</i>		Sim	
Supercondensador: alimentação dos circuitos em <i>stand-by</i>		Sim	
Supercondensador: alimentação do barramento DC		Sim	
Reinjecção no barramento DC do grupo de ascensores		Sim	
Reinjecção na rede do edifício		Sim	

Mensagens

Figura 41 – Simulador: *Input* – Introdução de dados

Fonte: Autor

⁵⁸ A opção por este *software* resulta da sua facilidade de utilização e adaptação por parte dos colaboradores da Schmitt-Elevadores, Lda. durante as reuniões de consultadoria a clientes.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

- a. Introdução dos dados gerais referentes ao ascensor a estudar. Deverão ser introduzidos pelo operador os seguintes dados:

Dados Gerais do Ascensor			
Carga nominal da cabina (EN81)		1000	(kg)
Peso da cabina	m_{cabina}	1600	(kg)
Peso do contrapeso	$m_{contrapeso}$	2000	(kg)
Velocidade nominal	v	2,5	(m/s)
Curso	H	72	(m)

Sistema de Tracção			
Aceleração	a	1,85	(m/s^2)
Inércia do motor	J_{motor}	0,75	($kg.m^2$)
Inércia do sistema	$J_{sistema}$	80,2	($kg.m^2$)
Raio da roda de tracção	r	0,5	(m)
Tipo de suspensão		2:1	
Potência motor (chapa características do motor)		11,9	(kW)
Consumo em modo motor medido - uma viagem		0,143	(kWh)
Consumo em modo gerador medido - uma viagem		0,074	(kWh)

Rendimentos			
Rendimento do motor	η_{motor}	90%	
Rendimento da cabina	η_{cabina}	90%	
Rendimento do redutor	$\eta_{redutor}$	90%	
Rendimento do conversor de frequência	$\eta_{conversor}$	90%	
Rendimento total	η_{total}	66%	

- b. Introdução dos dados específicos das medições realizadas para esse ascensor.
- c. Parametrização de campos (já pré-definidos, mas que podem ser alterados pelo utilizador), como o período de avaliação do investimento, a taxa de custo de capital (taxa de actualização), os custos dos componentes e o custo do kWh.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Dados para a Avaliação Económico-financeira			
Investimento inicial	k	1000	(€)
Vida útil do investimento	n	10	(anos)
Taxa de actualização	i	4,49%	
Custo da energia		0,1418	(€/kWh)

2. Processamento de dados:

Situação 1: cabina vazia - sentido subida - motor em modo gerador			
Cálculo do período 1: aceleração			
1.	Determinação da distância percorrida		
	velocidade inicial	v_0	0 m/s
	variação do tempo	Δt_1	1,35 s
			$\Delta t = \frac{\Delta v}{a}$
	Deslocação	$s_{deslocação}$	-1,69 m
			$s_{deslocação} = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$
2.	Aceleração angular	$d\omega/dt$	-3,7 rad.s ⁻²
			$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{a}{r}$
3.	Relação de massas	m_h	-400 kg
			$m_h = m_{maximal} + m_{cabina} - m_{contrape.}$
4.	Força de acção motor	$F_{acção\ motor}$	3325 N
			$[(m_h \times g) + F_{acção\ motor}] \times r = J \frac{d\omega}{dt}$
5.	Binário roda de tracção	T_{roda}	1662 Nm
			$T_{roda} = F \times r$
6.	Potência	$P(t)$	-6151 t
			$P(t) = T_{roda} \frac{d\omega}{dt}$
7.	Energia	E_1	-1,560139827 Wh
			$E_1 = \int_0^{\omega} P(t) dt$

Figura 42 – Simulador: Processamento de dados (excerto)

Fonte: Autor

- Neste módulo serão processados todos os dados introduzidos, recorrendo aos modelos matemáticos de suporte, bem como à base de dados com os custos dos equipamentos;
- O simulador processará com base nestes dados uma solução de recomendação para a utilização da energia potencialmente recuperada do ascensor em estudo. Esta solução passará por uma avaliação técnica, mas também por uma avaliação económico-financeira.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

3. Output:

a. O simulador terá como *output*:

- i. Um relatório com o estado actual do ascensor e com o consumo previsional anual total
- ii. Um relatório com um conjunto de recomendações sobre as soluções a adoptar para esse ascensor específico quanto à utilização da energia potencialmente recuperada, recorrendo ao “estado da arte” de soluções para a reutilização da energia recuperada em ascensores. Com base nos dados recolhidos sobre o ascensor em estudo, será apresentada a solução técnica (óptima) em termos energéticos para esse ascensor.

- b. Neste relatório constará também uma análise de investimento (recorrendo ao VAL, à TIR e ao período de recuperação actualizado), permitindo ao utilizador verificar se o investimento que poderá (deverá) realizar trará o retorno / benefício esperado.

Relatório: Avaliação de soluções a adoptar para aproveitamento da energia recuperada em ascensores

I. Características técnicas do ascensor:

Carga nominal da cabina:	1000 kg
Peso da cabina:	1600 kg
Peso do contrapeso:	2000 kg
Velocidade nominal:	2,5 m/s
Curso total:	72 m/s
Raio da roda de tracção:	0,5 m
Tipo de suspensão:	2,1

II. Outras características:

Ascensor dotado de conversor electrónico de frequência:	Sim
Categoria de utilização segundo VDI 4707:2009:	4
Possibilidade de interligação com outro ascensor:	Sim

III. Cálculo da Energia:

Energia em modo motor por manobra:	0,1196 kWh
Energia em modo gerador por manobra:	0,0515 kWh
Energia anual em modo motor:	7619,52 kWh
Energia anual em modo gerador:	3355,96 kWh
% de recuperação:	43%
Taxa de recuperação:	30%

IV. Dados auxiliares de avaliação:

Taxa de actualização:	4,49%
Preço de venda do kWh:	0,1418 €
Vida útil do investimento:	10 anos

V. Avaliação das diferentes soluções:

Hipótese 1 Alimentação dos circuitos em stand-by	Hipótese 2a Supercondensador: Alimentação dos circuitos em stand-by	Hipótese 2b Supercondensador: Alimentação do barramento DC	Hipótese 3 Reinjeção no barramento DC do grupo de ascensores	Hipótese 4 Reinjeção na rede do edifício
Avaliação Técnica: Sistema de fácil instalação Problemas com a durabilidade das baterias Bateria poderá não ser completamente carregada	Avaliação Técnica: Sistema de fácil instalação Permite uma rápida carga e descarga Baixa densidade energética Dificuldade em garantir uma tensão constante	Avaliação Técnica: Mitigação do pico de potência no arranque Melhor dimensionamento da instalação Elevada dimensão de cada módulo	Avaliação Técnica: Solução executável tecnicamente Fácil interligação dos conversores Não existe reinjeção na rede do edifício Necessidade de protecções especiais Necessidade de pelo menos 2 ascensores	Avaliação Técnica: Fácil sincronização com a rede do edifício Pode ser utilizado quando existe um ascensor Instalação de um conversor adicional Sistema equilibrado de protecções Maior complexidade de instalação
Avaliação Económico-financeira: Valor do investimento: 385,00 €	Avaliação Económico-financeira: Valor do investimento: 1500,00 €	Avaliação Económico-financeira: Valor do investimento: 1190,00 €	Avaliação Económico-financeira: Valor do investimento: 500,00 €	Avaliação Económico-financeira: Valor do investimento: 2100,00 €
VAL: -217,83 €	VAL: -1478,29 €	VAL: -1157,29 €	VAL: 3218,54 €	VAL: 1679,54 €
TIR: -10%	TIR: Não Calculável	TIR: Não Calculável	TIR: 65%	TIR: 19%
PRA: >10 anos	PRA: >10 anos	PRA: >10 anos	PRA: 2 anos	PRA: 6 anos
Conclusão: Não valerá a pena realizar o investimento Permitirá uma poupança anual: 149 kWh 21 €	Conclusão: Não valerá a pena realizar o investimento Permitirá uma poupança anual: 19 kWh 3 €	Conclusão: Não valerá a pena realizar o investimento Permitirá uma poupança anual: 29 kWh 4 €	Conclusão: Valerá a pena realizar o investimento Permitirá uma poupança anual: 3366 kWh 477 €	Conclusão: Valerá a pena realizar o investimento Permitirá uma poupança anual: 3366 kWh 477 €

Figura 43 – Simulador: *Output* – Relatório de avaliação

Fonte: Autor

5.3 Validação do simulador

O simulador foi validado com base na norma VDI4707:2009, nos valores medidos em diversos ascensores instalados e na modelização física relacionada com a recuperação de energia (ver anexo 3).

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Recorreu-se ainda à modelização de um ascensor em *Matlab-Simulink*. A análise dinâmica do funcionamento do ascensor permitiu confirmar os valores obtidos com o simulador. O modelo em *Matlab-Simulink* é apresentado em detalhe no anexo 4.

6. Avaliação dos resultados

6.1 Avaliação do grau de recuperação de energia

Tomando por base as medições realizadas à amostra representativa de 39 ascensores, obtiveram-se os seguintes resultados relativamente ao grau de recuperação de energia:

Tabela 15 – Resultados da avaliação do grau de recuperação de energia

Tabela de Medições e de Resultados

Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Peso da cabina [kg]	Peso do contrapeso [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Tipo de Edifício (1)	Categoria de Utilização (2)	Tecnologia de Tracção (3)	Arquitectura do Sistema (4)	Tipo de Máquina (5)	Energia em modo motor [kWh]	Energia em modo gerador [kWh]	Taxa de Recuperação de energia	Grau de recuperação de energia
7	VN100121	450	1000	1225	1,6	42	1	3	1	1	3	0,0290	0,0012	4%	4%
3	E12940	450	836	1061	1,0	12	1	1	1	4	3	0,0230	0,0010	4%	4%
20	E17222	320	500	660	0,6	12	1	2	1	1	3	0,0164	0,0014	9%	8%
25	VN1-45P4	300	400	550	1,0	27	2	4	1	1	3	0,0234	0,0023	10%	9%
27	E17048	630	700	1015	1,0	3	2	1	1	5	4	0,0131	0,0014	11%	10%
5	VN100000	630	700	1015	1,0	4	2	1	1	5	4	0,0066	0,0009	14%	12%
21	VN103037	320	660	820	1,0	12	1	2	1	1	3	0,0176	0,0025	14%	13%
4	VA197004	630	600	915	1,0	42	2	4	1	1	3	0,0600	0,0110	19%	15%
11	E12727	1000	960	1460	1,0	24	3	4	1	1	3	0,0880	0,0170	19%	16%
35	E10679	1000	960	1460	1,0	3	4	2	1	5	4	0,0096	0,0019	19%	16%
37	E12110	1000	1000	1500	1,0	24	7	2	1	5	4	0,0106	0,0022	20%	17%
18	VN199111	800	1280	1680	1,0	45	1	3	1	1	3	0,0761	0,0159	21%	17%
16	E10769	450	703	926	1,0	15	1	2	1	5	4	0,0255	0,0054	21%	17%
14	E11823	450	892	1117	1,0	30	1	3	1	5	4	0,0505	0,0110	23%	18%
36	E15958	630	800	1115	1,0	27	2	3	1	5	4	0,0712	0,0158	22%	18%
12	E12730	1600	1312	2112	1,0	28	3	4	1	1	3	0,1235	0,0280	23%	18%
17	VN199110	450	1000	1225	1,6	45	1	3	1	1	3	0,0537	0,0126	24%	19%
24	VN1-45P1	450	500	725	1,0	30	2	4	1	1	3	0,0397	0,0095	24%	19%
26	E14306	630	644	959	1,0	6	7	1	1	5	4	0,0130	0,0034	26%	21%
39	VN106073	1600	1450	2250	1,0	12	7	2	1	5	4	0,0574	0,0152	26%	21%
10	E10458	1600	1450	2250	1,0	12	3	4	1	5	4	0,0539	0,0162	30%	23%
19	E11341	630	705	1020	1,0	18	7	2	1	5	4	0,0362	0,0110	30%	23%
32	E16902	630	700	1015	1,0	24	1	2	1	5	4	0,0417	0,0127	31%	23%
38	VN106072	630	733	1048	1,0	15	1	2	1	5	4	0,0226	0,0069	31%	24%
34	E13949	630	800	1115	1,0	12	2	2	1	5	4	0,0247	0,0077	31%	24%
29	VN107012	450	665	890	1,0	18	1	2	1	5	4	0,0283	0,0089	31%	24%
22	E13607	630	726	1041	1,0	21	7	3	1	5	4	0,0456	0,0144	32%	24%
13	E12734	450	597	822	1,0	8	3	4	1	1	3	0,0159	0,0051	32%	24%
23	E13608	630	726	1041	1,0	21	7	3	1	5	4	0,0344	0,0116	34%	25%
30	VN107016	450	665	890	1,0	18	1	2	1	5	4	0,0257	0,0089	34%	26%
2	E10253	450	665	890	1,0	15	1	1	1	5	4	0,0170	0,0060	35%	26%
31	E14061	450	599	824	1,0	24	1	2	1	5	4	0,0262	0,0093	36%	26%
28	VN107014	450	665	890	1,0	18	1	2	1	5	4	0,0259	0,0092	36%	26%
33	E16907	450	650	875	1,0	24	1	2	1	5	4	0,0225	0,0080	36%	26%
15	E10764	450	726	951	1,0	15	1	2	1	5	4	0,0177	0,0065	37%	27%
8	E11477	1600	1700	2500	1,6	40	3	5	1	1	3	0,1227	0,0486	40%	28%
9	E11478	1600	1700	2500	1,6	40	3	5	1	1	3	0,1230	0,0489	40%	28%
6	VN100120	750	1400	1775	1,6	42	1	3	1	1	3	0,0959	0,0387	40%	29%
1	VN105003	800	1600	2000	2,5	72	2	4	1	1	3	0,1430	0,0740	52%	34%

Legenda:

(1) - Tipo de Edifício:

- 1 - Habitação
- 2 - Escritórios
- 3 - Hospital
- 4 - Shopping
- 5 - Transporte
- 6 - Indústria
- 7 - Outros

(2) - Categoria de Utilização:

- 1 - Muito baixa
- 2 - Baixa
- 3 - Média
- 4 - Elevada
- 5 - Muito elevada

(3) - Tecnologia de Tracção:

- 1 - Ascensor eléctrico
- 2 - Ascensor hidráulico

(4) - Arquitectura Sistema:

- 1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa central
- 2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral
- 3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1, indirecta
- 4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral
- 5 - Sem casa de máquinas, suspensão central
- 6 - Pistão central
- 7 - Sistema hidrocaço
- 8 - Outros

(5) - Tipo de máquina:

- 1 - Máquina com redutor de 1 velocidade
- 2 - Máquina com redutor de 2 velocidades
- 3 - Máquina com redutor e VVVV
- 4 - Máquina sem redutor e VVVV
- 5 - Válvulas hidráulicas controladas
- 6 - Válvulas hidráulicas reguladas
- 7 - Outros

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

A partir destes dados é possível retirar as seguintes conclusões:

1. O grau de recuperação de energia varia entre 4% e 34%;
2. O valor médio do grau de recuperação de energia será de 20%, ou seja em média, a energia recuperada em todos os ascensores da amostra representará 20% da energia total necessária para realizar uma manobra completa de subida e descida;
3. Quanto maior a categoria de utilização em que o ascensor se insere, maior o valor médio do grau de recuperação de energia:

Tabela 16 – Valor médio do grau de recuperação por categoria de utilização

Categoria de utilização	Valor médio Grau de recuperação de energia
1	15%
2	21%
3	19%
4	20%
5	28%

4. Quanto maior a carga nominal do ascensor, maior o grau médio de recuperação de energia:

Tabela 17 – Valor médio do grau de recuperação por carga nominal

Carga nominal (Kg)	Valor médio Grau de recuperação de energia
320	10%
450	21%
630	20%
1000	22%
1600	24%

5. As máquinas com redutor permitem em média um grau de recuperação de energia menor (17%) face às máquinas sem redutor (22%). Tal facto poderá resultar do menor rendimento que a máquina com redutor com motor assíncrono apresenta face à máquina sem redutor com motor síncrono (ver ponto 2.5).
6. Tendencialmente, quanto maior o curso, maior o valor médio do grau de recuperação de energia: este variará entre um valor médio de 13% para um curso até 5 metros e um valor médio de 21% para um curso acima de 30 metros.

6.2 Avaliação dos resultados das hipóteses estudadas de utilização da energia recuperada

Na tabela 15 são apresentados os resultados obtidos nas medições realizadas a todos os 39 ascensores da amostra seleccionada, bem como as soluções mais adequadas do ponto de vista técnico e económico-financeiro.

1. Apesar de as 5 hipóteses serem todas elas viáveis tecnicamente, apenas a hipótese 3 (Reinjecção da energia recuperada no barramento DC do grupo de ascensores) e a hipótese 4 (Reinjecção da energia recuperada na rede eléctrica do edifício) apresentam viabilidade económica, mas só para alguns dos ascensores.
2. A hipótese 3, que recorde-se, apenas pode ser implementada se existir no edifício um outro ascensor eléctrico com roda de aderência com conversor electrónico de frequência que permita facilmente interligar os barramentos DC, deverá ser preferencialmente instalada. Para ascensores pertencentes à categoria de utilização 4, o período de recuperação variará entre 1 e 8 anos. Para os ascensores da categoria de utilização 5, a recuperação do investimento ocorrerá num espaço temporal de apenas 1 ano.
3. As hipóteses 1 (carregamento de bateria para alimentação dos circuitos em *stand-by*) e 2 (carregamento de supercondensador para alimentação dos circuitos em *stand-by* e para alimentação do barramento DC) deverão ser abandonadas.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tabela 18 – Avaliação da viabilidade económica das diferentes hipóteses

Tabela de Medições e de Resultados

Pos.	Número Ascensor	Carga Nominal [kg]	Velocidade Nominal [m/s]	Curso [m]	Categoria de Utilização (2)	Taxa de Recuperação de energia	Grau de recuperação de energia	Hipótese 1	Hipótese 2.1	Hipótese 2.2	Hipótese 3	Hipótese 4
2	E10253	450	1,0	15	1	35%	34%	X	X	X	X	X
3	E12940	450	1,0	12	1	4%	26%	X	X	X	X	X
5	VN100000	630	1,0	4	1	14%	4%	X	X	X	X	X
26	E14306	630	1,0	6	1	26%	15%	X	X	X	X	X
27	E17048	630	1,0	3	1	11%	12%	X	X	X	X	X
15	E10764	450	1,0	15	2	37%	29%	X	X	X	X	X
16	E10769	450	1,0	15	2	21%	4%	X	X	X	X	X
19	E11341	630	1,0	18	2	30%	28%	X	X	X	X	X
20	E17222	320	0,6	12	2	9%	28%	X	X	X	X	X
21	VN103037	320	1,0	12	2	14%	23%	X	X	X	X	X
28	VN107014	450	1,0	18	2	36%	16%	X	X	X	X	X
29	VN107012	450	1,0	18	2	31%	18%	X	X	X	X	X
30	VN107016	450	1,0	18	2	34%	24%	X	X	X	X	X
31	E14061	450	1,0	24	2	36%	18%	X	X	X	X	X
32	E16902	630	1,0	24	2	31%	27%	X	X	X	X	X
33	E16907	450	1,0	24	2	36%	17%	X	X	X	X	X
34	E13949	630	1,0	12	2	31%	19%	X	X	X	X	X
35	E10679	1000	1,0	3	2	19%	17%	X	X	X	X	X
37	E12110	1000	1,0	24	2	20%	23%	X	X	X	X	X
38	VN106072	630	1,0	15	2	31%	8%	X	X	X	X	X
39	VN106073	1600	1,0	12	2	26%	13%	X	X	X	X	X
6	VN100120	750	1,6	42	3	40%	24%	X	X	X	√	X
7	VN100121	450	1,6	42	3	4%	25%	X	X	X	X	X
14	E11823	450	1,0	30	3	23%	19%	X	X	X	X	X
17	VN199110	450	1,6	45	3	24%	9%	X	X	X	X	X
18	VN199111	800	1,0	45	3	21%	21%	X	X	X	X	X
22	E13607	630	1,0	21	3	32%	10%	X	X	X	X	X
23	E13608	630	1,0	21	3	34%	26%	X	X	X	X	X
36	E15958	630	1,0	27	3	22%	24%	X	X	X	X	X
1	VN105003	800	2,5	72	4	52%	26%	X	X	X	√	√
4	VA197004	630	1,0	42	4	19%	26%	X	X	X	X	X
10	E10458	1600	1,0	12	4	30%	23%	X	X	X	√	X
11	E12727	1000	1,0	24	4	19%	26%	X	X	X	√	X
12	E12730	1600	1,0	28	4	23%	24%	X	X	X	√	X
13	E12734	450	1,0	8	4	32%	16%	X	X	X	X	X
24	VN1-45P1	450	1,0	30	4	24%	18%	X	X	X	X	X
25	VN1-45P4	300	1,0	27	4	10%	17%	X	X	X	X	X
8	E11477	1600	1,6	40	5	40%	24%	X	X	X	√	√
9	E11478	1600	1,6	40	5	40%	21%	X	X	X	√	√

Legenda:

X	Solução não viável economicamente
√	Solução viável economicamente

Em síntese apresentam-se as vantagens e desvantagens de cada hipótese estudada e respectivas conclusões:

	Vantagens	Desvantagens	Conclusões
Hipótese 1: Carregamento de bateria: alimentação dos circuitos em <i>stand-by</i>	Sistema de fácil instalação; Sistema de baixo custo; Não ocorre reinjeção na rede do edifício e logo não existe potencial de perturbação da rede eléctrica.	A bateria poderá não ser carregada com carga suficiente para poder alimentar as cargas em <i>stand-by</i> ; Durabilidade resumida da bateria perante os ciclos de carga e de descarga.	Tecnicamente viável; Não é viável economicamente; Solução poderá ser aplicada se se pretender melhorar a classe de eficiência energética em <i>stand-by</i> .

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

	Vantagens	Desvantagens	Conclusões
Hipótese 2.1: Carregamento do supercondensador: alimentação dos circuitos em stand-by	<p>Sistema de fácil instalação;</p> <p>Sistema permite mais de um milhão de ciclos de carga e descarga;</p> <p>Sistema permite uma carga rápida;</p> <p>Não ocorre reinjecção na rede do edifício e logo não existe potencial de perturbação da rede eléctrica.</p>	<p>Baixa densidade energética;</p> <p>Rápida descarga do condensador;</p> <p>Dificuldade em garantir uma tensão constante à medida que a carga se reduz;</p> <p>Necessidade de protecção do supercondensador à presença de componentes harmónicas.</p>	<p>Tecnicamente viável;</p> <p>Não é viável economicamente</p>

	Vantagens	Desvantagens	Conclusões
Hipótese 2.2: Carregamento do supercondensador: alimentação do barramento DC	<p>Sistema permite a mitigação do pico de potência;</p> <p>Alisamento da potência permite um melhor dimensionamento da instalação;</p> <p>Facilidade de instalação: <i>plug & play</i>;</p> <p>Não ocorre reinjecção na rede do edifício e logo não existe potencial de perturbação da rede eléctrica.</p>	<p>Elevado custo da solução;</p> <p>Peso e dimensão de cada módulo;</p> <p>Baixa densidade energética dos supercondensadores;</p> <p>Necessidade de protecção do supercondensador à presença de componentes harmónicas.</p>	<p>Tecnicamente viável.</p> <p>Não é viável economicamente.</p>

	Vantagens	Desvantagens	Conclusões
Hipótese 3: Reinjecção no barramento DC	<p>Fácil instalação: apenas interligação do barramento DC dos conversores existentes;</p> <p>Sistema de baixo custo;</p> <p>Não ocorre reinjecção na rede do edifício e logo não existe potencial de perturbação da rede eléctrica.</p>	<p>Necessidade de protecções especiais (dimensionamento cuidadoso de todo o sistema);</p> <p>Necessidade de existirem pelo menos 2 ascensores no mesmo edifício que possam ser fisicamente interligados</p>	<p>Esta solução só é tecnicamente viável para situações em que existam pelo menos 2 ascensores no edifício e que seja possível interligá-los fisicamente;</p> <p>Apenas economicamente viável para ascensores das categorias de utilização 4 e 5, e que apresentem uma carga nominal superior a 630 kg;</p> <p>Para ascensores de categorias 1, 2 e 3 não será economicamente viável.</p>

	Vantagens	Desvantagens	Conclusões
Hipótese 4: Reinjecção na rede eléctrica do edifício	<p>Fácil sincronização com a rede de alimentação;</p> <p>Fácil interligação dos barramentos DC dos diferentes conversores;</p> <p>Pode ser utilizado em edifícios onde só exista um único ascensor.</p>	<p>Necessidade de instalação de um conversor adicional para reinjectar a energia na rede do edifício;</p> <p>Injecção de potenciais perturbações na rede de alimentação do edifício;</p> <p>Necessidade de instalação de um sistema equilibrado de protecções.</p>	<p>Tecnicamente viável;</p> <p>Só é viável economicamente para ascensores das categorias de utilização 4 e 5 e que tenham de vencer cursos elevados;</p> <p>Para outros ascensores o investimento não será viável economicamente.</p>

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

	Vantagens	Desvantagens	Conclusões
Hipótese 5: Reinjecção na rede eléctrica pública	Fácil sincronização com a rede de alimentação; Fácil interligação dos barramentos DC dos diferentes conversores; Pode ser utilizado em edifícios onde só exista um único ascensor; Possibilidade de gerar uma receita para o proprietário do edifício.	Necessidade de instalação de um conversor adicional para reinjectar a energia na rede do edifício; Injecção de potenciais perturbações na rede eléctrica; Necessidade de instalação de um sistema equilibrado de protecções e de contador; Custos com licenciamentos e contadores.	Tecnicamente viável, mas necessidade de licença. A venda de energia à rede pública para estas circunstâncias não está regulada. Só é viável economicamente para ascensores das categorias de utilização 4 e 5 e que tenham de vencer cursos elevados; Para outros ascensores o investimento não será viável economicamente.

7. Conclusões e linhas futuras de investigação

A melhor contribuição dos ascensores para a eficiência energética passaria pela completa supressão do consumo de energia eléctrica. Contudo, e dado que para a utilização dos ascensores (seja para o transporte de pessoas ou de cargas) é necessário alimentar um sistema de tracção composto por um motor eléctrico, não será possível reduzir totalmente o consumo de energia eléctrica.

Uma outra forma de melhorar a eficiência energética nos ascensores poderá passar pela adopção de componentes que permitam aumentar a eficiência energética dos ascensores ou desligar selectivamente componentes do ascensor quando este se encontra em modo *stand-by*, como foi proposto por Franco e Ferreira (2009).

No presente trabalho estudaram-se outras soluções que permitem a melhoria da eficiência energética nos ascensores eléctricos, procurando tirar-se partido de um fenómeno físico que ocorre nos sistemas de tracção dos ascensores: a recuperação de energia.

No estudo, cujo âmbito se circunscreve apenas aos ascensores eléctricos de roda de aderência dotados com conversores electrónicos de frequência, avaliaram-se 5 hipóteses de melhoria da eficiência energética nos ascensores através da recuperação de energia. Na grande maioria dos ascensores eléctricos com roda de aderência dotados de conversores electrónicos de frequência instalados e em operação em Portugal, a energia que eventualmente podia ser recuperada é dissipada na forma de energia calorífica na resistência de frenagem.

Aquilo que aqui se propõe é que essa energia recuperada seja utilizada para alimentar outros equipamentos ligados à rede de distribuição eléctrica do edifício, como a iluminação ou a ventilação, ou para alimentar a máquina do ascensor quando esta estiver a funcionar

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

em modo motor ou ainda para cobrir as necessidades de energia eléctrica do ascensor quando este se encontra em modo *stand-by*.

Teoricamente, num ascensor, se não existissem perdas, a energia recuperada deveria ser igual à energia utilizada em modo motor. Contudo, devido às perdas por atrito (atrito nas guias e resistência ao ar durante a deslocação de componentes móveis), às perdas do motor (perdas no cobre, perdas no entreferro, perdas de ventilação e perdas mecânicas) e em máquinas com redutor, às perdas mecânicas no redutor, a energia recuperada será sempre inferior à energia absorvida pelo sistema.

Do estudo realizado com base numa amostra representativa de 39 ascensores, subdivididos pelas 5 categorias de utilização definidas na norma VDI 4707:2009 foi possível obter as seguintes conclusões:

1. Verificou-se que o grau de recuperação de energia varia entre 4% e 34%. Apesar da percentagem de recuperação de energia, em muitas situações não é economicamente vantajoso instalar um sistema de aproveitamento da energia recuperada, principalmente nos ascensores das categorias 1, 2 e 3. Para estes ascensores será mais vantajoso do ponto de vista económico investir em sistemas que permitam uma poupança do consumo energético em *stand-by* (Franco e Ferreira, 2009). Contudo, e antes de se tomar uma decisão definitiva, deverá proceder-se a uma medição de uma manobra completa (movimento da cabina vazia no sentido descendente e ascendente) do ascensor e simular o resultado no simulador desenvolvido (ver ponto 5) para identificar.
2. Em novos ascensores fará sentido prever de raiz a instalação de conversores electrónicos de frequência regenerativos, desde que o benefício obtido seja superior ao custo acrescido que a sua instalação implicará. Os fabricantes estão a dotar os novos modelos de conversores com rectificadores constituídos por IGBTs (ver ponto 2.3), garantindo dessa forma o fluxo de energia nos dois sentidos, isto é, da rede de alimentação para o motor (quando a máquina está em modo motor) e do motor para a rede de alimentação (quando a máquina está em modo gerador). Com a redução dos custos desta tecnologia, recomenda-se que se preveja a instalação deste tipo de conversores. A energia eléctrica recuperada poderá ser reinjectada na rede eléctrica do edifício sendo aproveitada para alimentar outras cargas.
3. Para ascensores já instalados dotados de conversores electrónicos de frequência, e que se enquadrem nas categorias 4 e 5, recomenda-se a:
 - a. Adopção da hipótese 3 – reinjecção da energia recuperada no barramento DC, se existirem ascensores em grupo.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

- b. Adopção da hipótese 4 – reinjeção da energia recuperada na rede eléctrica do edifício, se não existirem ascensores em grupo.
4. Para as restantes categorias não fará sentido do ponto de vista económico-financeiro realizar o aproveitamento da energia recuperada.
5. Os ascensores que geram a maior quantidade de energia ao longo de um ano são os que apresentam as seguintes características:
 - a. Categoria de utilização superior (tipicamente, categorias 4 e 5).
 - b. Maior velocidade (tipicamente superior a 1 m/s): quanto maior a velocidade, maior o balanço energético envolvido.
 - c. Maior carga nominal: quanto maior forem as massas envolvidas, maior o balanço energético.
 - d. Maior curso: quanto maior a distância a percorrer, maior será a energia gerada.

Como referência, os ascensores estudados da categoria de utilização 5, apresentam um consumo anualizado entre 6100 e 6350 kWh. A energia potencialmente recuperada rondará os 2400 a 2500 kWh. Já um ascensor da categoria de utilização 1, apresenta um consumo entre 26 e 47 kWh. A energia potencialmente recuperada rondará os 2,5 a 16,2 kWh.

6. Os ascensores podem contribuir, sob determinadas condições (ver ponto 6.2), para a melhoria do desempenho energético global de um edifício. Tomando por base a amostra representativa de 39 ascensores, e anualizando o seu consumo (por recurso à norma VDI 4707:2009) obtém-se um valor de 36402 kWh. A energia recuperada estimada ao longo do mesmo período e para os mesmos ascensores será de 11842 kWh. Pressupondo que se poderia reinjectar toda a energia recuperada na rede eléctrica do edifício, obter-se-ia uma poupança acumulada de 32%.

Como linhas futuras de investigação podem ser referidas as seguintes, que poderão contribuir complementarmente para uma melhoria da eficiência energética nos ascensores:

1. Sistemas de armazenamento de energia: com a evolução muito rápida de soluções para armazenamento de energia, como por exemplo de novas baterias, do volante de inércia, das bobinas supercondutoras, das pilhas de combustível e das soluções mistas baterias com supercondensadores, deverá acompanhar-se o seu desenvolvimento, quer do ponto de vista técnico quer do ponto de vista económico. Idealmente, deveria ser desenvolvido um sistema de armazenagem de energia com

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

alta densidade de energia e de potência, e que pudesse ser rapidamente carregado, descarregando a sua energia lentamente ao longo do tempo, quando o ascensor se encontrar em modo *stand-by*.

2. Estudar em detalhe o impacto (a redução) que a utilização da energia recuperada em ascensores pode ter no consumo global de energia eléctrica por parte dos ascensores (recorde-se que Almeida *et. al.*, 2010, estimam que todos os ascensores instalados em Portugal tenderão a consumir anualmente 713 GWh).
3. Instalação de conversores electrónicos de frequência regenerativos (numa lógica *plug & play*) em ascensores eléctricos de roda de aderência que ainda não sejam dotados de um conversor. Uma solução pode passar pela adaptação do sistema desenvolvido pela Schmitt-Elevadores, Lda – o sistema *Liftcomfort*. Trata-se de um quadro autónomo com um conversor electrónico de frequência que pode ser interligado ao quadro de comando do ascensor e à máquina com redutor de motor assíncrono de uma ou duas velocidades existente. Esta solução apresenta vantagens, como o reduzido custo de instalação, dado que se mantém a configuração base do ascensor, a rapidez de instalação e o benefício que resulta da adopção de um conversor electrónico de frequência para comandar a máquina de tracção (redução do consumo energético, redução do desgaste dos componentes electromecânicos e possibilidade de aproveitamento da energia recuperada).
4. Estudar a recuperação de energia em ascensores hidráulicos, que representam em Portugal cerca de 10% dos ascensores totais instalados (isto é, cerca de 10400 ascensores).
5. Estudar soluções (ver o estudo realizado por Franco e Ferreira em 2009) para reduzir as perdas de energia nos ascensores, por exemplo através da redução de perdas por atritos (utilização de rodas em vez de roçadeiras, suspensão central da cabina, etc.), ou através da utilização de máquinas mais eficientes (o recurso a máquinas sem redutor com motor síncrono, serão um exemplo), com classes de eficiência IE3 segundo a norma IEC 60034-30:2008 / EN 60034-30:2009 (Beleza Carvalho, 2013).
6. Estudar outras aplicações para a energia recuperada, nomeadamente para aquecimento de águas sanitárias ou para o sistema de climatização do edifício.
7. Estudar eventualmente conjuntamente com a DGEG - Direcção de Geral de Energia e Geologia, a possibilidade de se proceder à venda da energia recuperada à rede eléctrica pública e de se regulamentar todo este processo.

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, Aníbal, *et. al.* 2005. **Manual de boas práticas de eficiência energética**. Lisboa: ISR – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra e BCSD Portugal – Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável.
- ALMEIDA, Aníbal, *et. al.* 2010. **E4 – Energy Efficient Elevators & Escalators. WP4: Estimation of savings**. Coimbra: ISR – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra. Consultado em www.e4project.eu.
- ALMEIDA, Aníbal, *et. al.* 2010. **E4 – Energy Efficient Elevators & Escalators. WP4: Technology Assessment**. Coimbra: ISR – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra. Consultado em www.e4project.eu.
- ALVES, Mário. 2003. **ABC das Máquinas Eléctricas**. Porto: ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto – Departamento de Engenharia Electrotécnica.
- ATTAIANESE, C. *et. al.* 2007. **A High Efficiency Conversion System for Elevators**. University of Cassino. IEEE. Consultado em www.ieeexplore.ieee.org.
- BANCO DE PORTUGAL. 2013. **Indicadores de Conjuntura**. Lisboa – Banco de Portugal Publicações. Consultado em www.bportugal.pt.
- BARNEY, Gina. 2003. **Elevator Traffic Handbook – Theory and Practice**. Nova Iorque: Spon Press.
- BELEZA CARVALHO, José. 2008. **Máquinas Assíncronas de Indução**. Porto. ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto – Departamento de Engenharia Electrotécnica.
- BELEZA CARVALHO, José e MESQUITA BRANDÃO, Roque. 2009. **Eficiência Energética em Equipamentos de Força Motriz**. Porto: ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- BELEZA CARVALHO, José. 2013. **Utilização Racional de Energia em Equipamentos de Força Motriz**. Porto. ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto – Departamento de Engenharia Electrotécnica. Revista Neutro à Terra Nº 11.
- BOLLA, Mario. 2007. **Verbesserung der Energieeffizienz von Aufzügen und Förderanlagen durch Entwicklung eines Neuartigen Frequenzumformers – Jahresbericht 2007**. Seftigen: Bundesamt für Energie, Suíça.
- CARIANI, Walter e MANDUZIO, Laura. 2010. **E4 – Energy Efficient Elevators and Escalators. Public Buildings Procurement – Guidelines for Lifts and Escalators**. Roma: ENEA. Consultado em www.e4project.eu.
- CASTANHEIRA, Luís e BORGES GOUVEIA, Joaquim. 2004. **Energia, Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**. Porto: Spi – Sociedade Portuguesa de Inovação.
- CEEETA. 2001. **Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos – Parte III – Tecnologias de Armazenamento de Energia**. Lisboa: Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

CÓIAS, Vítor e FERNANDES, Susana. 2006. **Reabilitação Energética dos Edifícios: Porquê?** Lisboa: Oz – Diagnóstico Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda.

CONTROL TECHNIQUES DRIVES. 2007. **Installationshandbuch Unidrive SP Rückspeiseeinheit**. CT. Consultado em www.controltechniques.de

CONTROL TECHNIQUES DRIVES. 2011. **Application Note – Unidrive SP – DC bus paralleling – Issue 1**. CT. Consultado em www.controltechniques.com

CONTROL TECHNIQUES DRIVES. 2012. **User Guide – Unidrive SP – Elevator Solution Software – Variable Speed AC Drive for induction and servo motors**. CT. Consultado em www.controltechniques.com

CONTROL TECHNIQUES DRIVES. 2012. **Unidrive SP – Sinusförmige Ein- und Rückspeiseeinheit – Internes Dokument**. CT. Documento interno

FITZGERALD, A. et. al. 2003. **Electric Machinery**. Nova Iorque: McGraw Hill.

FRANCHI, C. 2007. **Acionamentos Eléctricos**. São Paulo: Editora Érica, Ltda.

FRANCHI, C. 2008. **Inversores de Frequência – Teoria e Aplicações**. São Paulo: Editora Érica, Ltda.

FRANCO, Miguel e FERREIRA, Jacinto. 2009. **Optimização Energética de um Ascensor**. Porto: ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto.

GAMBOA, José. 2005. **Ascensores e Elevadores**. Lisboa: Rei dos Livros.

GARRIDO, Emmanuel. 2010. **Concepção e Certificação de Nova Geração de Candeeiros de Iluminação Pública – Versão Provisória**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Consultado em www.paginas.fe.up.pt/~ee03096/Dissertacao_vprov2.pdf em 30.03.2013.

GRBOVIĆ, C. et. al. 2011. **The Ultracapacitor-based Controlled Electric Drives with Braking and Ride-through Capability: Overview and Analysis**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58 No. 3. Consultado em www.ieeexplore.ieee.org.

GRBOVIĆ, C. et. al. 2012. **A Three-Terminal Ultracapacitor-Based Energy Storage and PFC Device for Regenerative Controlled Electric Drives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59 No. 1. Consultado em www.ieeexplore.ieee.org.

GUEDES, Manuel. 2001. **Sistemas Electromecânicos de Conversão de Energia**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

GUSSOW, Milton. 2004. **Electricidade Básica**. Lisboa: Editora McGraw-Hill de Portugal, Lda.

HIRZEL, Simon e DÜTSCHKE, Elisabeth. 2010. **E4 - Energy Efficient Elevators and Escalators. Guidelines for new lifts installations and retrofitting**. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. Consultado em www.e4project.eu.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

JANOVSKY, Lumomír. 1999. *Elevator Mechanical Design*. 3ª Edição. Mobile USA: Elevator World, Inc.

KOCH, Michael. 2012. *Dynamischer Energiespeicher DES 2.0 – Betriebsanleitung*. Ubstadt-Weiher. Consultado em www.bremsenergie.de em 06.05.2013.

KÜNTSCHER, Dietmar. 2006. *Energiesparende Aufzugssysteme*. Lift-Report nº2 – Ano 32.

LI, Zheng e RUAN, Yi. 2012. *A Novel Energy Saving Control System for Elevator Based on Supercapacitor Bank Using Fuzzy Logic*. IEEE. Consultado em www.ieeexplore.ieee.org.

LOPES, Maria. 2011. *Elaboração e Análise de Projectos de Investimento*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Edições.

MATIAS, José. 2005. *Máquinas Eléctricas*. 5ª Edição. Lisboa: Didáctica Editora.

MEIRELES, Vitor. 2005. *Circuitos Eléctricos*. 3ª Edição revista. Lisboa: Lidel – Edições Técnicas, Lda.

NIPKOW, Jürg e SCHALCHER, Max. 2005. *Energy consumption and efficiency potentials of lifts*. Zurique: SAFE – Swiss Agency for Efficient Energy Use.

NIPKOW, Jürg. 2005. *Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale bei Aufzügen*. Zurique: Bundesamt für Energie.

OYARBIDE, Estanis, et. al. 2011. *Ultracapacitor-based plug & play energy-recovery system for elevator retrofit*. Universidad de Zaragoza. IEEE. Consultado em www.ieeexplore.ieee.org.

PALMA, João. 2008. *Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável*. 2ª Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian – Serviço de Educação e Bolsas.

PAIVA, J. Sucena. 2005. *Redes de Energia Eléctrica – Uma Análise Sistémica*. Lisboa: IST Press

RODRIGUES, José e MATIAS, José. 2005. *Máquinas Eléctricas – Transformadores*. Lisboa: Didáctica Editora.

SPIEGEL, Murray. 2000. *Estatística*. Lisboa: Editora McGraw-Hill de Portugal, Lda.

VALUE. 2010. *Novas Tecnologias Energéticas – Roadmap Portugal 2050 – Análise das novas tecnologias energéticas nacionais e cenarização do seu impacto no sistema energético nacional*. Lisboa. Fundo de Apoio à Inovação. Consultado em www.dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/918939/1/D1 em 30.03.2013

Directivas, Leis e Normas:

DIRECTIVA 2012/27/UE do do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de Outubro de 2012 – *Eficiência energética e alteração das Directivas 2009/125/CE e 2010/30/UE*. Jornal Oficial da União Europeia.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

DIRECTIVA 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 – **Desempenho energético dos edifícios**. Jornal Oficial da União Europeia.

DIRECTIVA 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de Outubro de 2009 – **Criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia**. Jornal Oficial da União Europeia.

DIRECTIVA 2006/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de Maio de 2006 – **Máquinas – Altera a Directiva 1995/16/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho de 1995, relativa à aproximação das legislações dos Estados membros respeitantes aos ascensores**. Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

DIRECTIVA 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 06 de Julho de 2005 – **EuP – Energy Using Products – Requisitos de Concepção Ecológica dos Produtos que Consomem Energia**. Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

DIRECTIVA 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 – **EPB – Energy Performance of Buildings – Desempenho Energético de Edifícios**. Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

DIRECTIVA 1995/16/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho de 1995 – **Directiva Ascensores**. Jornal Oficial das Comunidades Europeias.

DECRETO-LEI nº 215-A/2012 de 8 de Outubro – **Altera as bases gerais aplicáveis ao exercício das actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade**. Diário da República 1ª Série - Nº 194 (08.10.2012), p. 5588 e ss.

DECRETO-LEI nº 215-B/2012 de 8 de Outubro – **Altera o regime jurídico aplicável às actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade, bem como os procedimentos aplicáveis ao acesso àquelas actividades**. Diário da República 1ª Série - Nº 194 (08.10.2012), p. 5588-(45) e ss.

DECRETO-LEI nº 34/2011 de 8 de Março – **Estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade a partir de recursos renováveis, por intermédio de unidades de miniprodução**. Diário da República 1ª Série - Nº 47 (08.03.2011), p. 1316-1325.

DECRETO-LEI nº 118-A/2010 de 25 de Outubro – **Altera o regime jurídico aplicável à produção de energia eléctrica por intermédio de instalações de pequena potência**. Diário da República 1ª Série - Nº 207 (25.10.2010), p. 4834-(2) e ss.

DECRETO-LEI nº 176/2008 de 26 de Agosto – **Transposição parcial para a ordem jurídica interna a Directiva nº 2006/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de Maio, relativa às máquinas e que altera a Directiva nº 95/16/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho**. Diário da República 1ª Série – Nº 164 (26.08.2008), p. 5988-5989.

DECRETO-LEI nº 363/2007 de 2 de Novembro – **Estabelece o regime jurídico aplicável à produção de energia eléctrica por intermédio de instalações de pequena potência**. Diário da República 1ª Série - Nº 211 (02.11.2007), p. 7978-7984.

DECRETO-LEI nº 172/2006 de 23 de Agosto – **Estabelece o regime jurídico aplicável às actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade**,

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

bem como os procedimentos aplicáveis ao acesso àquelas actividades. Diário da República 1ª Série - Nº 162 (23.08.2006), p. 6118-6156.

DECRETO-LEI nº 29/2006 de 15 de Fevereiro – **Estabelece as bases gerais aplicáveis ao exercício das actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade.** Diário da República 1ª Série –A, nº 33 (15.02.2006), p. 1189-1203.

DECRETO-LEI nº 295/98 de 22 de Setembro – **Transposição para a ordem jurídica interna da Directiva 1995/16/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho de 1995.** Diário da República I Série A. Nº 219 (22.09.1998), p. 4892-4909.

DECRETO-LEI nº 513/70 de 30 de Outubro – **Regulamento de Segurança de Elevadores Eléctricos.** Imprensa Nacional (1971).

RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS nº 20/2013 de 10 de Abril – **Aprovação do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 (PNAEE 2016) e do Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020 (PNAER 2020).** Diário de República 1ª Série – nº 70 (10.04.2013), p. 2024 ss.

PORTARIA nº 596/2010 de 30 de Julho – **Aprova o Regulamento da Rede de Transporte e o Regulamento da Rede de Distribuição.** Diário da República 1ª Série - Nº 147 (30.07.2010), p. 2923-2954.

DESPACHO nº 5255/2006 de 8 de Março – **Aprova o Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS).** Diário da República 2ª Série - Nº 48 (08.03.2006), p. 3334-3362.

NORMA PORTUGUESA NP EN 81-1:2000 – **Regras de Segurança para o Fabrico e Instalação de Elevadores – Parte 1: Ascensores Eléctricos.** Fevereiro de 2001. Instituto Português da Qualidade.

NORMA PORTUGUESA NP EN 81-2:2000 – **Regras de Segurança para o Fabrico e Instalação de Elevadores – Parte 2: Ascensores Hidráulicos.** Fevereiro de 2001. Instituto Português da Qualidade.


NORMA PORTUGUESA NP EN 81-1:2000+A3:2009 – **Regras de segurança para o fabrico e instalação de elevadores – Parte 1: Ascensores eléctricos.** Dezembro de 2009. Instituto Português da Qualidade.

NORMA SUIÇA SIA 380/4:2006 – **Electricity in Buildings** (2006), Swiss Society of Engineers and Architects (SIA).

NORMA ALEMÃ VDI 4707:2009 – **Ascensores – Eficiência Energética** (2009), Verein Deutscher Ingenieure (VDI).

NORMA EUROPEIA EN 60034-30:2009 / IEC 60034-30:2008 – **Máquinas eléctricas rotativas – Parte 30: Classes de eficiência de motores trifásicos de indução de gaiola de velocidade simples (código IE).** 2009, Cenelec.

Anexo 1 - Formulário de levantamento de dados para medições

Recuperação de energia nos ascensores		 SCHMITT+SOHN ELEVADORES	
Formulário para recolha de dados			
Dados Gerais:			
Data instalação:	<input type="text"/>	Local Inst.:	<input type="text"/>
Fabricante:	<input type="text"/>	Referência:	<input type="text"/>
Tipo de Edifício:			
1 - Habitação:	<input type="checkbox"/>	2 - Escritórios:	<input type="checkbox"/>
4 - Shopping:	<input type="checkbox"/>	5 - Transporte:	<input type="checkbox"/>
3 - Hospital:	<input type="checkbox"/>	6 - Indústria:	<input type="checkbox"/>
7 - Outros:	<input type="text"/>		
Categoria de utilização segundo VDI 4707:2009:			
Categoria 1:	<input type="checkbox"/>	Categoria 2:	<input type="checkbox"/>
Categoria 3:	<input type="checkbox"/>	Categoria 4:	<input type="checkbox"/>
Categoria 5:	<input type="checkbox"/>		
Tecnologia de tracção:			
Ascensor eléctrico por roda de aderência:	<input type="checkbox"/>	Ascensor hidráulico:	<input type="checkbox"/>
Arquitectura do sistema:			
1 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e central:	<input type="checkbox"/>		
2 - Com casa de máquinas, suspensão 1:1, directa e lateral:	<input type="checkbox"/>		
3 - Com casa de máquinas, suspensão 2:1:	<input type="checkbox"/>		
4 - Sem casa de máquinas, suspensão lateral:	<input type="checkbox"/>		
5 - Sem casa de máquinas, suspensão central:	<input type="checkbox"/>		
6 - Pistão central:	<input type="checkbox"/>		
7 - Sistema hidrocabo:	<input type="checkbox"/>		
8 - Outros:	<input type="checkbox"/>		<input type="text"/>
Tipo de máquina:			
1 - Máquina com redutor de 1 velocidade	<input type="checkbox"/>	Modelo:	<input type="text"/>
2 - Máquina com redutor de 2 velocidades	<input type="checkbox"/>	Modelo:	<input type="text"/>
3 - Máquina com redutor e VVVF	<input type="checkbox"/>	Modelo:	<input type="text"/>
4 - Máquina sem redutor e VVVF	<input type="checkbox"/>	Modelo:	<input type="text"/>
5 - Válvulas hidráulicas controladas	<input type="checkbox"/>	Modelo:	<input type="text"/>
6 - Válvulas hidráulicas reguladas	<input type="checkbox"/>	Modelo:	<input type="text"/>
7 - Outros	<input type="checkbox"/>	Descrição:	<input type="text"/>
Carga Nominal (kg):			
320 kg	<input type="checkbox"/>	450 kg	<input type="checkbox"/>
630 kg	<input type="checkbox"/>	1000 kg	<input type="checkbox"/>
1600 kg	<input type="checkbox"/>	2000 kg	<input type="checkbox"/>
Outra:	<input type="text"/>		
Peso da cabina e peso do contrapeso (kg):			
Peso da cabina:	<input type="text"/>	(kg)	Peso do contrapeso:
			<input type="text"/>
			(kg)
Velocidade Nominal (m/s):			
0,6/0,15:	<input type="checkbox"/>	1,0/0,25:	<input type="checkbox"/>
0,50:	<input type="checkbox"/>	0,63:	<input type="checkbox"/>
1,0:	<input type="checkbox"/>	1,60:	<input type="checkbox"/>
Outra:	<input type="text"/>		
Curso e número de pisos:			
Número de pisos:	<input type="text"/>	Curso:	<input type="text"/>
			(m)
Tipo de comando:			
Sem conversor electrónico de frequência:	<input type="checkbox"/>	Com conversor electrónico de frequência:	<input type="checkbox"/>
Possibilidade de interligação com outros ascensores			
Não:	<input type="checkbox"/>	Sim:	<input type="checkbox"/>
Se sim, quantos ascensores podem ser interligados:	<input type="text"/>		
Potência nominal do motor e factor de potência (indicados na chapa de características da máquina):			
Potência nominal indicada na chapa de características	<input type="text"/>	(kW)	Factor de potência (cos φ):
			<input type="text"/>
Data de recolha de dados:			
	<input type="text"/>		

Anexo 2: Análise estatística dos dados obtidos através das medições

Com base nos dados obtidos nas medições realizadas à amostra representativa de 39 ascensores foi realizada a seguinte análise estatística:

A taxa de recuperação média da energia foi de 0,2617 com um desvio padrão de 0,10758 enquanto o grau de recuperação média de energia foi de 0,2015 e o desvio padrão de 0,069107.

Em seguida e para cada uma das variáveis foram determinados os intervalos de confiança para a média da população. Para tal foi considerada a seguinte variável fulcral:

$$VF = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{n}} \sim t_{(n-1)}$$

No entanto, como a dimensão da amostra é maior que 30 (n=39) utilizando o Teorema do Limite Central é possível a variável fulcral à Distribuição Normal :

$$VF = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{n}} \sim N(0,1)$$

Assim, considerando um grau de confiança de 95%, obtem-se para a taxa de recuperação de energia, o seguinte intervalo de confiança:

$$[0,261795 \pm \frac{0,03376}{\text{erro}}]$$

Ou seja, com 95% de confiança, com base nesta amostra, a taxa de recuperação de energia situa-se entre [0,2280 ; 0,2956].

Considerando agora o grau de recuperação de energia, e com o mesmo grau de confiança, o intervalo é o seguinte:

$$[0,2015 \pm \frac{0,02169}{\text{erro}}]$$

Ou seja, com 95% de confiança, com base nesta amostra, o grau de recuperação de energia situa-se entre [0,179812; 0,223191].

Anexo 3: Modelização física da recuperação de energia

Como base de trabalho para o simulador em *Microsoft Excel* realizou-se a modelização física de um ascensor com as mesmas características de um ascensor que foi sujeito a medições – um dos ascensores instalado no edifício Tower Plaza – Concept Offices (já apresentado no ponto 4.3).

Dados:

Carga da cabine: 0 kg (cabina vazia)

Massa da estrutura da cabine: 1600 kg

Massa do contrapeso: 2000 kg

Curso: 72 m

Raio da roda da tracção: 0,50 m

Velocidade nominal: 2,5 m/s

Aceleração: $1,85 \text{ m/s}^2$

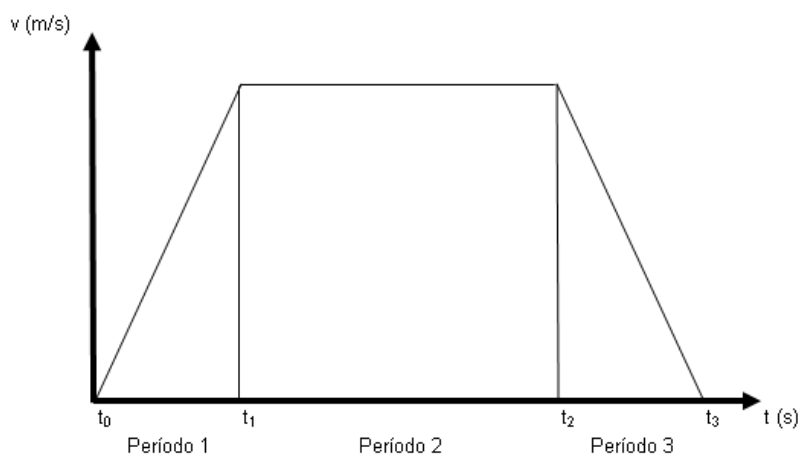
Momento de inércia do motor: $0,75 \text{ kg.m}^2$

Momento de inércia do sistema: $80,20 \text{ kg.m}^2$

Rendimento da máquina com motor síncrono: 90%

Rendimento do conversor electrónico de frequência: 90%

Rendimento da caixa do ascensor com suspensão central: 90%



Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Situação 1: Cabina vazia – sentido subida

Cálculo do período 1: a aceleração

Determinação da distância percorrida: $s_{deslocação} = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$

com $v_0 = 0$ m/s e $\Delta t_1 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{-2,5 - 0}{-1,85} = 1,35$ s

Então $s_{deslocação} = -1,69$ m

Sabendo que $T_m - T_r = J \frac{d\omega}{dt}$

E que

$$F = m \times g$$

$$T = F \times r$$

Com a aceleração angular dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{a}{r} = -\frac{1,85}{0,5} = -3,7 \text{ rad.s}^{-2}$$

E a relação de massas dada por:

$$m_h = m_{no\ min\ al} + m_{cabina} - m_{contrapeso}$$

$$m_h = 0 + 1600 - 2000 = -400 \text{ kg}$$

Então, a força de acção da máquina tem de ser tal que esta imponha a aceleração de $a = 1,85$ m/s².

Assim,

$$[(m_h \times g) + F_{acção\ motor}] \times r = J \frac{d\omega}{dt}$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Substituindo obtém-se:

$$\left[(-400 \times 9,81) + F_{\text{acção motor}}\right] \times 0,5 = (80,20 + 0,75) \times (-3,7)$$
$$F_{\text{acção motor}} = 3325 \text{ N}$$

E como:

$$T_{\text{roda}} = F \times r$$
$$T_{\text{roda}} = 3325 \times 0,5 = 1662 \text{ Nm}$$

Sendo

$$\omega(t) = \frac{d\omega}{dt} t$$

e

$$P(t) = T_{\text{roda}} \frac{d\omega}{dt} t$$

$$P(t) = 1662 \times (-3,70) t = -6151 t$$

(O binário da máquina e a velocidade têm sentidos contrários: a máquina absorve potência mecânica).

Calculando a energia:

$$E_1 = \int_0^{\Delta t} P(t) dt$$

$$E_1 = \int_0^{1,35} 6151 t dt$$

$$E_1 = -5616 \text{ Ws} \Leftrightarrow E_1 = -1,56 \text{ Wh}$$

Cálculo do período 2: regime permanente – velocidade constante

Binário resistente:

$$T_r = m_h \times g \times r = -400 \times 9,81 \times 0,5 = -1962 \text{ Nm}$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Velocidade angular:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2,5}{0,5} = 5 \text{ rad/s}$$

Atendendo às convenções fixadas para os sentidos das forças, velocidades e acelerações, obtém-se:

Na carga:

$$P = T_r \times \omega = -1962 \times (-5) = 9810 \text{ W}$$

Na máquina:

$$P = T_r \times \omega = 1962 \times (-5) = -9810 \text{ W}$$

Distância percorrida:

$$s_{\text{permanente}} = \text{CURSO} - s_{\text{dinâmico1}} - s_{\text{dinâmico2}} = 72 - 1,69 - 1,69 = 68,62 \text{ m}$$

Tempo necessário para percorrer a distância: Como a velocidade é constante:

$$s_{\text{permanente}} = v \times \Delta t_2$$

Então

$$\Delta t_2 = \frac{s_{\text{permanente}}}{v} = \frac{68,62}{2,5} = 27,45 \text{ s}$$

Calculo da energia absorvida pela máquina eléctrica:

$$E_2 = P \times \Delta t_2 = -9810 \times 27,45 = -269271,2 \text{ Ws} \Leftrightarrow E_2 = -74,79 \text{ Wh}$$

Cálculo do período 3: a desaceleração

Determinação da distância percorrida: $s_{\text{deslocação}} = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$

$v_0 = 2,5 \text{ m/s}$ e

$$\Delta t_3 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{0 - (-2,5)}{1,85} = 1,35 \text{ s}$$

Então $s_{\text{deslocação}} = -1,69 \text{ m}$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Com a aceleração angular dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} = +\frac{a}{r} = \frac{1,85}{0,5} = 3,7 \text{ rad.s}^{-2}$$

2. Sabendo que

$$T_m - T_r = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$[(m_h \times g) + F_{\text{acção motor}}] \times r = J \frac{d\omega}{dt}$$

Substituindo, obtém-se:

$$[(-400 \times 9,81) + F_{\text{acção motor}}] \times 0,5 = 80,95 \times (3,7)$$

$$F_{\text{acção motor}} = 4523 \text{ N}$$

Acção frenante – operação em modo gerador

$$T_{\text{roda}} = F \times r$$

$$T_{\text{roda}} = 4523 \times 0,5 = 2261,52 \text{ Nm}$$

Como $v_{\text{inst.}} = v_0 + a\Delta t$

$$\text{Então } \omega(t) = \omega_0 + \frac{d\omega}{dt} \Delta t = -\frac{2,5}{0,5} + \frac{1,85}{0,5} \Delta t = -5 + 3,7\Delta t$$

$$P(t) = T_{\text{roda}} \times \omega(t)$$

$$P(t) = 2261,52 \times (-5 + 3,70\Delta t) = -11307,58 + 8367,60\Delta t$$

Cálculo do intervalo de tempo:

$$t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 1,35 + 27,45 = 28,80 \text{ s}$$

$$t_3 = \Delta t_2 + \Delta t_3 = 28,80 + 1,35 = 30,15 \text{ s}$$

$$\Delta t = t - 28,80$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Logo substituindo, obtém-se:

$$P(t) = -11307,58 + 8367,60(t - 28,80) = -252295 + 8367,60t$$

Calculando a energia:

$$E_3 = \int_{t_2}^{t_3} P(t) dt$$

$$E_3 = \int_{28,80}^{30,15} (-252295 + 8367,60t) dt$$

$$E_3 = -7640 \text{ Ws} \Leftrightarrow E_3 = -2,12 \text{ Wh}$$

Calculo da energia total da manobra

$$E_{\text{troda}} = E_1 + E_2 + E_3 = (-1,56) + (-74,79) + (-2,12) = -78,48 \text{ Wh}$$

$$E_{\text{motor}} = E_{\text{troda}} \times \eta_t = -51,71 \text{ Wh}$$

$$\text{Com } \eta_{\text{total}} = \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{reductor}} \times \eta_{\text{caixa}} \times \eta_{\text{conversor}} = 66\%$$

Situação 2: Cabina vazia – sentido descida

Cálculo do período 1: a aceleração

$$\text{Determinação da distância percorrida: } s_{\text{deslocação}} = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$$

$$\text{com } V_0 = 0 \text{ m/s e } \Delta t_1 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{2,5 - 0}{1,85} = 1,35 \text{ s}$$

$$\text{Então } s_{\text{deslocação}} = 1,69 \text{ m}$$

$$\text{Sabendo que } T_m - T_r = J \frac{d\omega}{dt}$$

E que

$$F = m \times g$$

$$T = F \times r$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Com a aceleração angular dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{a}{r} = \frac{1,85}{0,5} = 3,7 \text{ rad.s}^{-2}$$

E a relação de massas dada por

$$m_h = m_{\text{no min al}} + m_{\text{cabina}} - m_{\text{contrapeso}}$$

$$m_h = 0 + 1600 - 2000 = -400 \text{ kg}$$

Então, a força de acção da máquina tem de ser tal que esta imponha a aceleração de $a = 1,85 \text{ m/s}^{-2}$.

Assim,

$$\left[(m_h \times g) + F_{\text{acção motor}} \right] \times r = J \frac{d\omega}{dt}$$

Substituindo obtém-se:

$$\left[(-400 \times 9,81) + F_{\text{acção motor}} \right] \times 0,5 = 80,95 \times (3,7)$$

$$F_{\text{acção motor}} = 4523,03 \text{ N}$$

E como:

$$T_{\text{roda}} = F \times r$$

$$T_{\text{roda}} = 4523,03 \times 0,5 = 2261,52 \text{ Nm}$$

Sendo

$$\omega(t) = \frac{d\omega}{dt} t$$

e

$$P(t) = T_{\text{roda}} \frac{d\omega}{dt} t$$

$$P(t) = 2261,52 \times 3,70 t = 8367,61 t$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Calculando a energia:

$$E_1 = \int_0^{\Delta t} P(t) dt$$

$$E_1 = \int_0^{1,35} 8367,61t dt$$

$$E_1 = 7640,25,62 \text{ Ws} \Leftrightarrow E_1 = 2,12 \text{ Wh}$$

Cálculo do período 2: regime permanente – velocidade constante

A energia é a mesma do período 2 da situação 1, mas em módulo, uma vez que a energia agora é fornecida, uma vez que a máquina opera em modo motor.

$$E_2 = 74,79 \text{ Wh}$$

Cálculo do período 3: a desaceleração

Determinação da distância percorrida: $s_{deslocação} = v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$

$$V_0 = 2,5 \text{ m/s e}$$

$$\Delta t_3 = \frac{\Delta v}{a} = \frac{0 - 2,5}{-1,85} = 1,35 \text{ s}$$

$$\text{Então } s_{deslocação} = 1,69 \text{ m}$$

Com a aceleração angular dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{a}{r} = -\frac{1,85}{0,5} = -3,7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

Sabendo que

$$T_m - T_r = J \left(-\frac{d\omega}{dt} \right)$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

$$\left[(m_h \times g) + F_{\text{acção motor}} \right] x r = J \left(- \frac{d\omega}{dt} \right)$$

Substituindo, obtém-se:

$$\left[(-400 \times 9,81) + F_{\text{acção motor}} \right] x 0,5 = 80,20 x (-3,7)$$
$$F_{\text{acção motor}} = 3325 \text{ N}$$

$$T_{\text{roda}} = F x r$$

$$T_{\text{roda}} = 3325 x 0,5 = 1662,5 \text{ Nm}$$

Como $v_{\text{inst.}} = v_0 + a\Delta t$

$$\text{Então } \omega(t) = v_0 + \frac{d\omega}{dt} \Delta t = \frac{2,5}{0,5} + \frac{(-1,85)}{0,5} t = 5 - 3,7\Delta t$$

$$P(t) = T_{\text{roda}} x \omega(t)$$

$$P(t) = 1662,5 x (5 - 3,70\Delta t) = 8312,5 - 6151,25\Delta t$$

Cálculo do intervalo de tempo:

$$t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 1,35 + 27,45 = 28,80 \text{ s}$$

$$t_3 = \Delta t_2 + \Delta t_3 = 28,80 + 1,35 = 30,15 \text{ s}$$

$$\Delta t = t - 28,80$$

Logo substituindo, obtém-se:

$$P(t) = 8312,5 - 6151,25(t - 28,80) = 185466 - 6151,19t$$

Calculando a energia:

$$E_3 = \int_{t_2}^{t_3} P(t) dt$$

$$E_3 = \int_{28,80}^{30,15} (185466 - 6151,19t) dt$$

$$E_3 = 5616,5 \text{ Ws} \Leftrightarrow E_3 = 1,56 \text{ Wh}$$

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Calculo da energia total da manobra

$$E_{troda} = E_1 + E_2 + E_3 = 78,48Wh$$

$$E_{motor} = E_{troda} / \eta_t = 119,10Wh$$

$$\text{Com } \eta_{total} = \eta_{motor} \times \eta_{reductor} \times \eta_{caixa} \times \eta_{conversor} = 66\%$$

Anexo 4: Modelização de um ascensor eléctrico com roda de aderência em Matlab-Simulink

Na concepção do modelo em *Matlab-Simulink* separou-se cada um dos componentes do sistema, eléctrico e mecânico (elevador), para uma maior facilidade de parametrização e interpretação de resultados, conforme figura A4.1. Foram ainda concentrados todos os outputs das grandezas mecânicas consideradas num mesmo bloco (caixa redutora), que simula o acoplamento mecânico com o motor eléctrico.

As grandezas eléctricas de monitorização são retiradas do próprio bloco variador/motor. O modelo foi dividido em três blocos principais – Bloco Mecânico, Bloco Eléctrico e Blocos de medições de grandezas eléctricas e mecânicas -, que por sua vez se subdividem em outros blocos secundários, conforme a seguir se descreve.

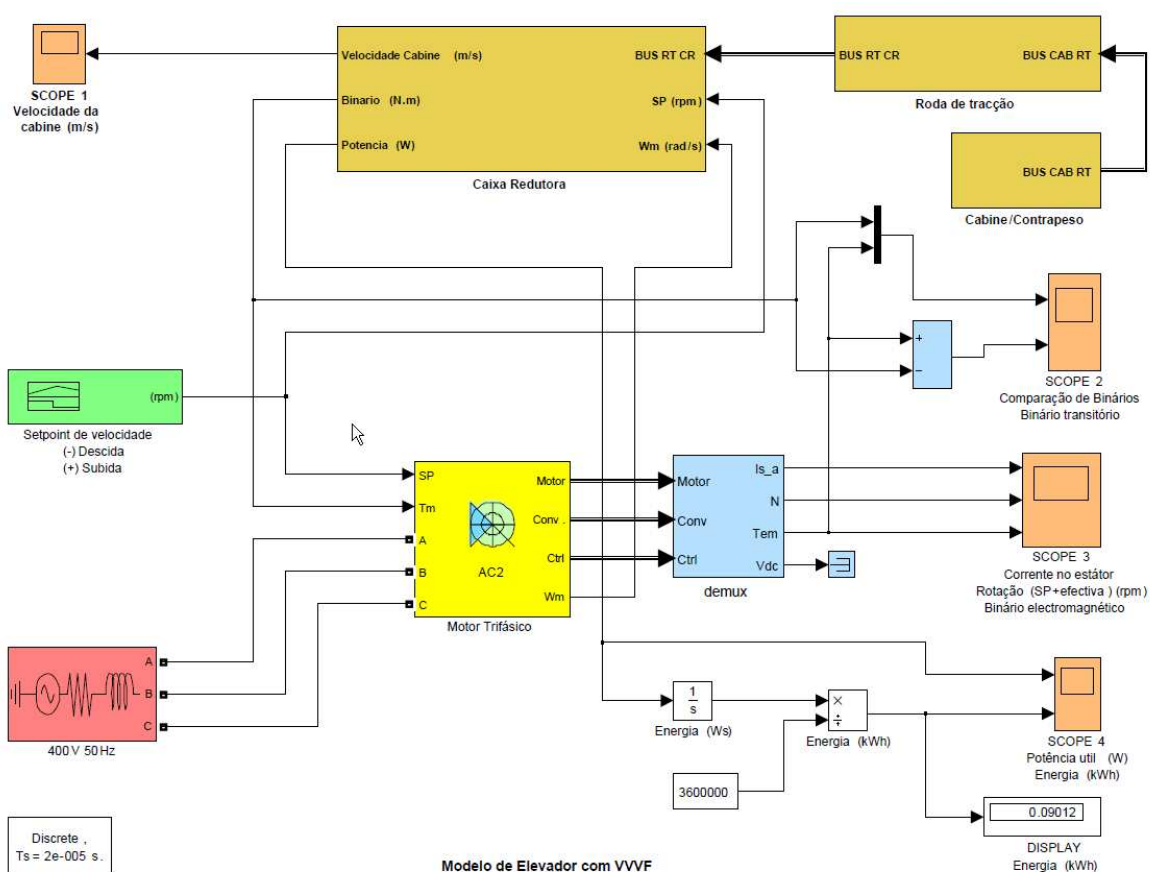


Figura A4.1 – Diagrama geral de blocos do ascensor com conversor electrónico de frequência

1. Bloco mecânico (ascensor)

O bloco mecânico foi dividido em três sub-blocos, correspondentes a cada um dos componentes mecânicos do sistema:

1. A cabine do ascensor;
2. A roda de tracção;
3. A caixa redutora.

1.1 Cabine do Ascensor

A cabina do ascensor pode ser modelizada a partir do seguinte conjunto de sub-blocos:

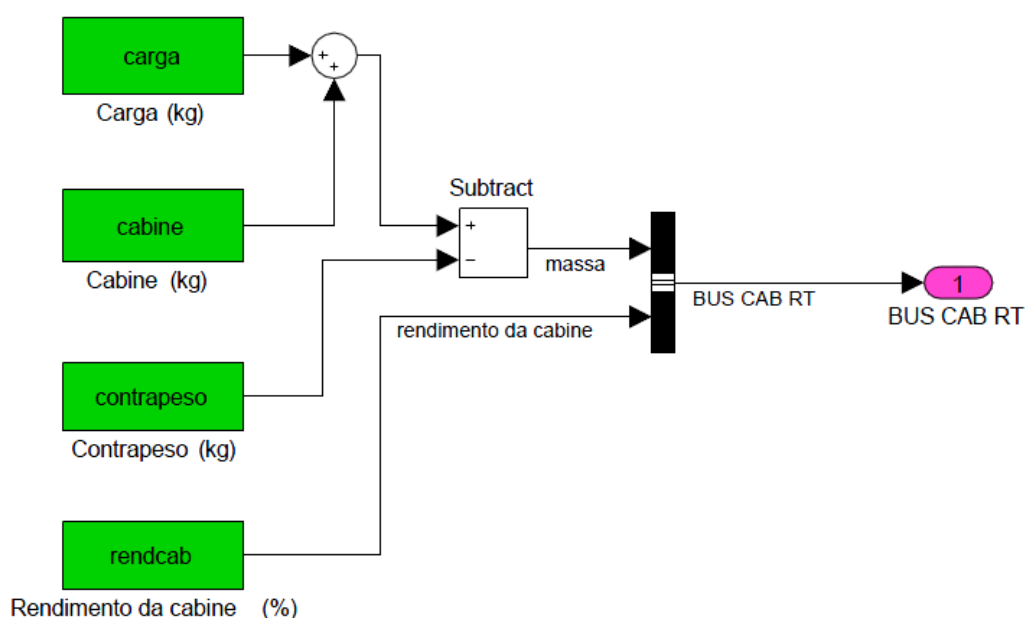


Figura A4.2 – Diagrama de blocos Simulink da cabina

Na janela de parametrização da cabina do ascensor são introduzidas as massas do conjunto cabina/contrapeso. O bloco *simulink* faz a soma das massas da carga e da cabina e finalmente subtrai a massa do contrapeso⁵⁹. Se o resultado for positivo o sistema vai criar um binário resistente positivo na subida da cabina e negativo na descida da mesma, conforme tabela A4.1. Considerou-se ainda o rendimento da cabina, que representa as perdas por atrito das roçadeiras da cabina nas guias, etc.

⁵⁹ É prática na indústria de ascensores que o contrapeso seja dimensionado para contrabalançar a massa da cabina + 50% da carga nominal da cabina. Assim, para uma cabina com uma carga útil de 800 kg e um peso próprio de 1600 kg, o contrapeso terá de ter uma massa de 2000 kg.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

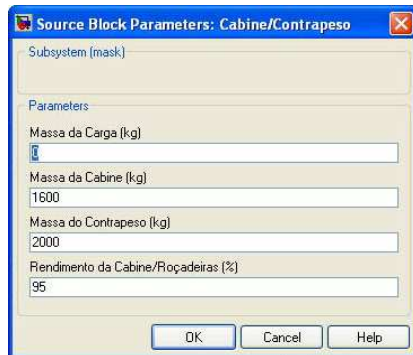


Figura A4.3 – Janela de parametrização da cabine/contrapeso

Tabela A4.1 – Sentido do binário resistente em função do movimento da cabine e das massas

Binário Resistente		
Movimento da Cabine	Massas (kg)	
	(Carga+Cabine) > Contrapeso	(Carga+Cabine) < Contrapeso
Subida	positivo	negativo
Descida	negativo	positivo

O *output* deste bloco será a massa resultante do sistema cabine/contrapeso responsável pela força vertical do sistema (peso), que poderá ser positiva ou negativa e será um dos inputs do bloco da roda de tracção.

1.2 Roda de Tracção

A roda de tracção da máquina elevadora pode ser modelizada a partir do seguinte conjunto de sub-blocos:

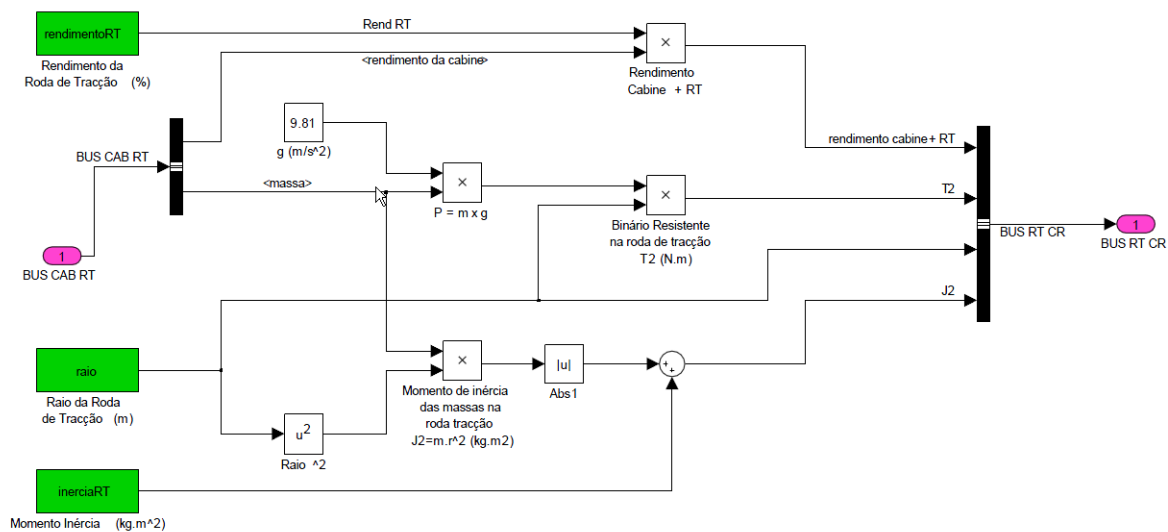


Figura A4.4 - Diagrama de blocos *simulink* da roda de tracção

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Na janela de parametrização, são introduzidos os dados relativos à roda de tracção, nomeadamente o momento de inércia, o rendimento e o raio da roda de tracção

Outro dos *inputs* é a massa resultante do sistema cabine/contrapeso, responsável por parte do momento de inércia do sistema que influenciará o binário transitório (arranques/paragens) e pelo binário permanente, quando a cabina atinge a velocidade nominal.

No bloco *simulink* da roda de tracção será calculado o binário resistente permanente referido ao seu eixo, bem como o momento de inércia resultante da carga total do sistema cabine/contrapeso, sendo este referido também ao mesmo eixo. Estas duas grandezas associadas ao rendimento da roda de tracção e ao seu raio, integrarão um *bus* de dados de *output*, que será um dos *inputs* do bloco da caixa redutora.



Figura A4.5 – Janela de parametrização da roda de tracção

1.3 Caixa Redutora

A caixa redutora da máquina elevadora pode ser modelizada a partir do seguinte conjunto de sub-blocos para a situação de variação de velocidade:

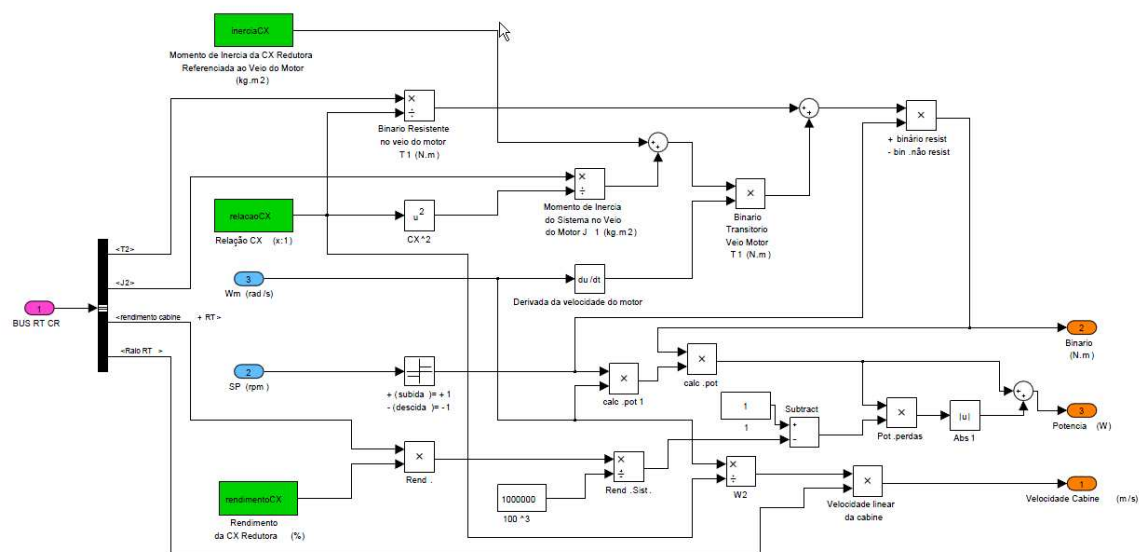


Figura A4.6 - Diagrama de blocos *simulink* da caixa redutora

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

O input de dados do bloco simulink da caixa redutora divide-se pelo *bus* de dados proveniente da roda de tracção, pelos parâmetros introduzidos pelo utilizador, tais como o momento de inércia, rendimento e a relação da caixa redutora e finalmente pela velocidade de rotação (rad/s) no veio do motor (rotação efectiva do motor) e pelo *Setpoint* de velocidade. A velocidade de rotação vai permitir o cálculo do binário transitório, bem como a potência solicitada e a velocidade linear da cabine.

De referir ainda que o *Setpoint* de velocidade neste bloco tem uma actuação indirecta, permitindo unicamente definir o sentido do binário resistente. Os *outputs* deste bloco são o binário resistente, referido ao veio do motor, que será o *input* mecânico do motor de indução, que por sua vez vai gerar a velocidade de rotação que serve de input ao mesmo bloco. São ainda *outputs*, a potência solicitada pelo sistema e a velocidade linear da cabine, sendo estas duas grandezas só para monitorização, não tendo por isso qualquer interferência com o sistema.



Figura A4.7 – Janela de parametrização da caixa redutora

1.4 *Setpoint* de velocidade do motor

Através desta função define-se a curva de aceleração, desaceleração e velocidade nominal da carga, quer à subida quer à descida. Pretende-se simular uma viagem completa da cabina. O Tempo de arranque/paragem foi definido com o sendo de um segundo.

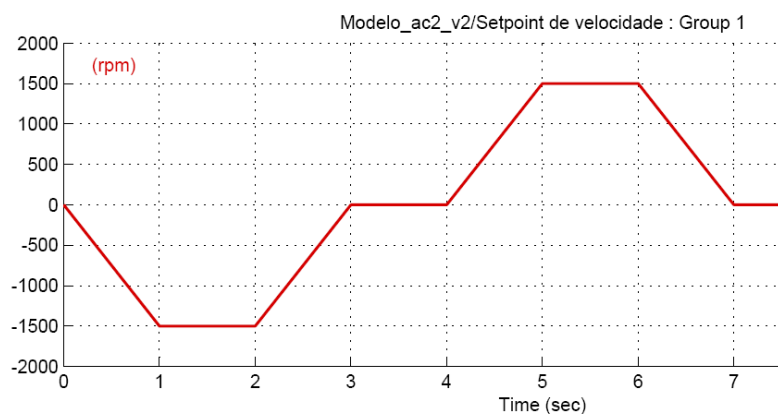


Figura A4.8 – *Setpoint* de velocidade do motor com variação de velocidade

2. Bloco Eléctrico

Este bloco é constituído por dois sub-blocos:

2.1 Fonte de alimentação.

Este bloco estabelece as condições da rede eléctrica (400V AC 50Hz), conforme os parâmetros introduzidos na janela de parametrização.

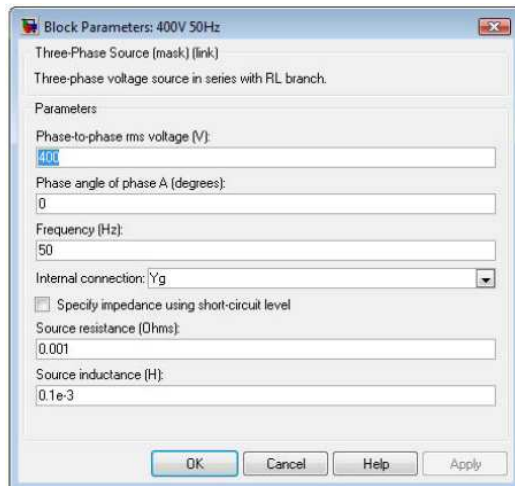


Figura A4.9 – Janela de parametrização da fonte de alimentação (input de dados pelo utilizador)

2.2 Bloco Simulink AC2

O bloco AC2 incorpora dois equipamentos, o variador de frequência e o motor de indução e ainda *inputs* e *outputs*, que servem para controlar e monitorizar o sistema. Relativamente aos *inputs* de controle, faz-se referência ao *Setpoint* de velocidade que foi já indicado na figura xx, que vai servir de base à aceleração/desaceleração do sistema, bem como à sua velocidade permanente e ainda o binário resistente, gerado pelo sistema mecânico (*output* da caixa redutora).

O bloco AC2 permite ainda escolher o *input* mecânico, que poderia ser a velocidade de rotação ou binário resistente. Optou-se por adoptar o binário resistente como *input* mecânico. Como num ascensor a velocidade é imposta, o que vai variar no sistema é o binário resistente que depende da carga total e poderá variar em cada viagem do elevador.

O bloco AC2 vai gerar a velocidade de rotação que serve de input ao bloco da caixa redutora, que é velocidade real do sistema. A velocidade real depende de todas as grandezas mecânicas e eléctricas do sistema, bem como do *Setpoint* de velocidade. Existem ainda vários *outputs* de controlo ou meramente indicativos e para monitorização do sistema.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

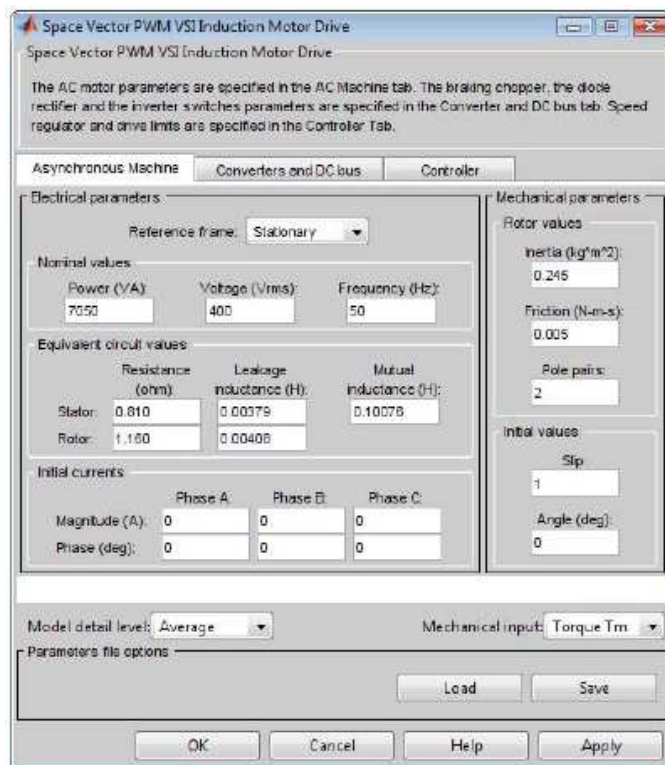


Figura A4.10 – Janela de parametrização do motor de indução trifásico

Na janela de parametrização do motor, são introduzidos todos os dados que caracterizam a máquina, eléctricos e mecânicos. Foram considerados os parâmetros recolhidos do ascensor real estudado – ver tabela 13 do ponto 4.3.

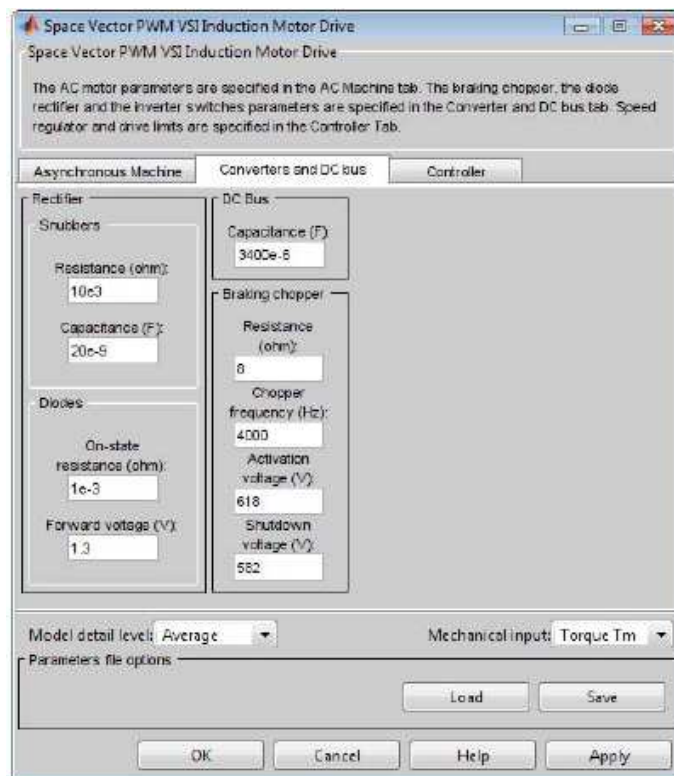
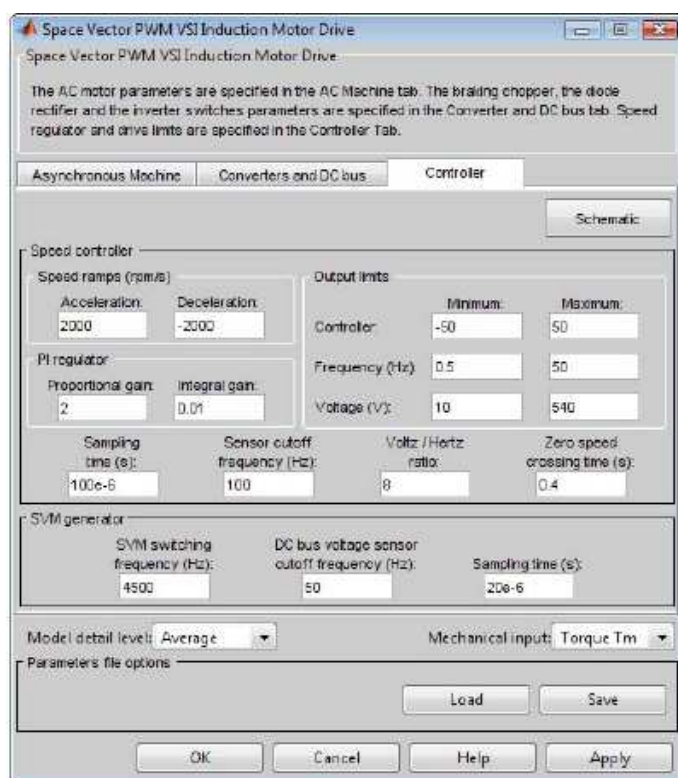


Figura A4.11 – Janela de parametrização do conversor e barramento DC

Na janela de parametrização do conversor e barramento DC, faz-se especial referência à capacidade do barramento que é a responsável pelo filtro dos harmónicos e consequente estabilização de correntes, e à frequência de comutação do chopper. Quanto mais elevada for esta frequência de comutação, mais precisa será a onda gerada pelo conversor e consequente maior será a estabilidade mecânica do sistema.

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia



No bloco de parametrização do controlador será definida a forma como irá actuar o variador no motor, ou seja, a rapidez de resposta a alterações de velocidade provocadas pelo binário resistente e *Setpoint* de velocidade. De referir o controlador PI, a tensão no barramento DC, a aceleração e a desaceleração do motor, os limites de *output* de frequência e a relação tensão / frequência.

Figura A4.12 – Janela de parametrização do controlador do sistema variador/motor

3. Blocos de medições de grandezas eléctricas e mecânicas.

Para efectuar medições aplicaram-se blocos do tipo *scope* (visualização de *outputs*) na caixa redutora, com os seguintes agrupamentos de variáveis:

SCOPE 1:

- Velocidade linear da cabine (m/s)

SCOPE 2:

- Binário resistente / binário electromagnético (N.m)
- Binário transitório (arranque/paragem do sistema) (N.m)

SCOPE 3:

- Corrente no estátor (A)
- Velocidade parametrizada/real (rpm)
- Binário electromagnético (N.m)

SCOPE 4:

- Potência útil (W)
- Energia (kWh)

Melhoria da eficiência energética nos ascensores: a recuperação de energia

Tomando por base os dados do ascensor nº1 da tabela 13 apresentada no ponto 4.3, obtiveram-se os seguintes resultados, simulando uma viagem completa (à subida e à descida) com a cabina vazia:

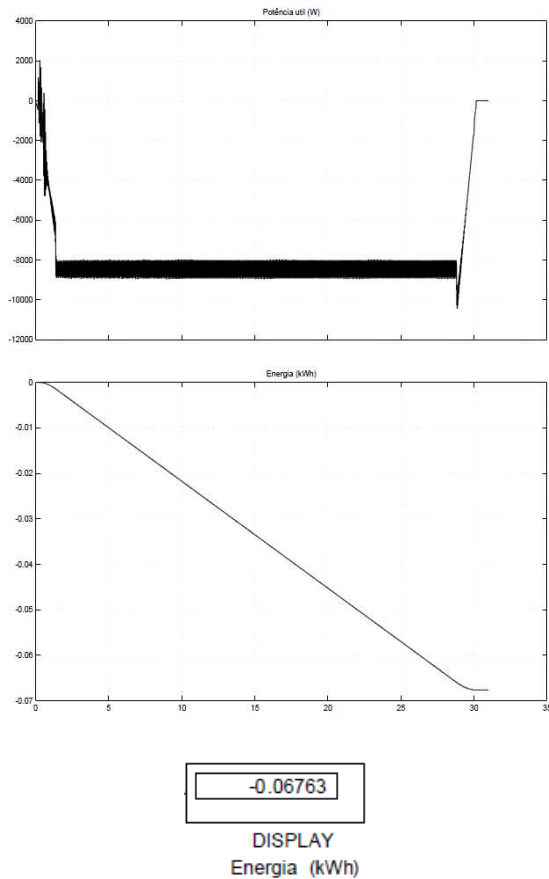


Figura A4.13 – Potência e Energia – manobra de subida

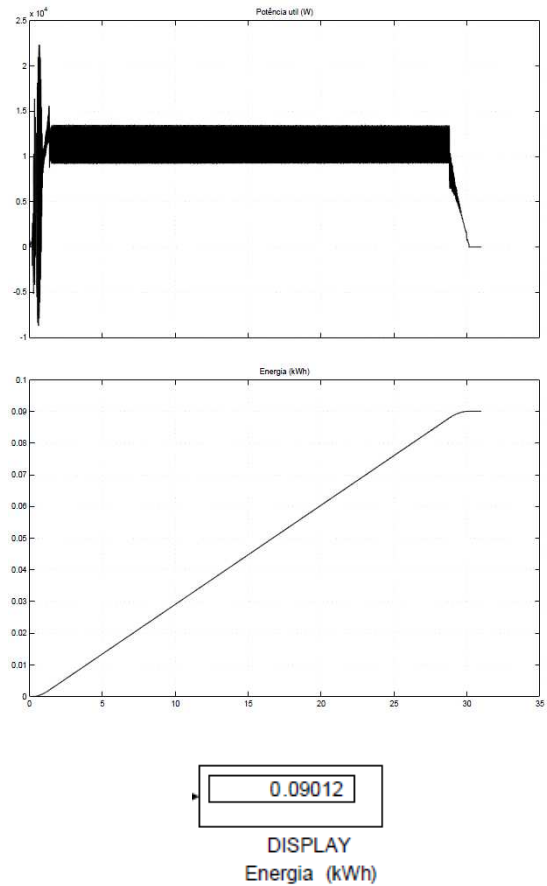


Figura A4.14 – Potência e Energia – manobra de descida