

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO TROLLER

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ELEVADORES

Porto Alegre

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ELEVADORES

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Dr. Fausto Bastos Líbano

Porto Alegre

2015

EDUARDO TROLLER

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ELEVADORES

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para graduação em Engenharia Elétrica.

Porto Alegre, 22 de Junho de 2015.

ORIENTADOR

Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e a minha irmã pelo apoio integral em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Fausto Bastos Líbano, pelo tempo e paciência destinados na orientação deste projeto.

Aos colegas de curso e de trabalho pelas trocas de experiência e ensinamentos.

E à minha família, pelo apoio integral e por me dar o suporte necessário durante este período.

RESUMO

Hoje existem em funcionamento no Brasil elevadores com tecnologias de diversas épocas. Desde os mais antigos, controlados por relé, utilizando máquinas acionadas por métodos ineficientes e desconfortáveis e com iluminação de cabina de alto consumo, até os módulos de controle modernos, com máquinas de ímã permanente ou de indução de alta performance, iluminação LED, software inteligente e frenagem regenerativa. Neste trabalho são apontados os princípios básicos de funcionamento das tecnologias encontradas nos elevadores em funcionamento, principalmente no mercado brasileiro, com foco nas características mais impactantes no consumo energético do equipamento. Em seguida é feita uma explicação a respeito da VDI 4707, documento que descreve um método padrão de medição de consumo de energia de elevadores que é reconhecido em diversos países. Um estudo de caso é apresentado, onde são estudados os consumos de energia de cinco elevadores distintos, seguindo os critérios da VDI 4707. O objetivo deste trabalho é estudar e comparar do ponto de vista da eficiência energética as diferentes tecnologias encontradas nos elevadores em funcionamento e seu impacto no orçamento dos edifícios onde se encontram.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica. Eficiência Energética. Elevador. Consumo.

ABSTRACT

Nowadays there are elevators with many different technologies operating in Brazil. From the earliest models, activated using a relay logic, using machines started with uncomfortable and inefficient methods and high power consumption cabin lightning, to the current models that use modern control techniques and high performance permanent magnet and induction motors, LED lightning, intelligent software techniques and regenerative braking. In this work, the main technologies used in the elevator industry are approached, focusing in the characteristics most relevant to the energy consumption. The VDI 4707, a document that describes a standard method of measuring elevators energy consumption is explained. A case study is presented, five different models were measured according to VDI 4707 and the results are presented and analyzed. The objective of this work is to study and compare the energetic efficiency of different elevators and its impact on a regular building's energy bill.

Keywords: Electrical Engineering. Energy Efficiency. Elevator. Energy Consumption.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. MOTIVAÇÃO	12
1.2. OBJETIVO	12
1.3. CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS.....	13
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DE ELEVADORES	14
2.1. ELEVADORES HIDRÁULICOS E DE TRACÇÃO	14
2.2. ENGRENADO OU NÃO ENGRENADO	15
2.3. MOTORES E ACIONAMENTO	16
2.3.1 Motores de Corrente Contínua	16
2.3.2 Motor de Indução Trifásico	21
2.3.3 Motor Síncrono de Imãs Permanentes	31
2.4. FRENAGEM REGENERATIVA	32
3. CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ELEVADORES	36
3.1. ORIGEM DO MÉTODO	36
3.2. DEMANDA EM STANDBY	36
3.3. DEMANDA DE VIAGEM	36
3.4. CATEGORIAS DE USO	37
3.5. CLASSES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	38
3.6. EQUIPAMENTO UTILIZADO	39
3.7. LOCAL DE MEDIÇÃO	39
4. RESULTADOS MEDIÇÕES	41
4.1. ELEVADOR A – VVVF COM FRENAGEM REGENERATIVA	41
4.2. ELEVADOR B – VVVF SEM FRENAGEM REGENERATIVA	44
4.3. ELEVADOR C – CONTROLE C.C	45
4.4. ELEVADOR D – ACVV	47
4.5. ELEVADOR E – AC2.....	50
5. ANÁLISE DOS DADOS	53
5.1. COMPARATIVO DE CONSUMO	53
5.2. FRENAGEM REGENERATIVA	56
6. CONCLUSÕES	57

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Elevador Hidráulico.	14
Figura 2. Elevador de Tração.	15
Figura 3. Motor de Corrente Contínua para Elevadores.....	17
Figura 4. Conjunto Motor Gerador.....	18
Figura 5. Controle C.C.	19
Figura 6. Moto CC alimentado por PWM.	20
Figura 7. Característica da tensão e corrente na armadura.	21
Figura 8. Motor de Indução engrenado (esquerda) e não engrenado (direita).	23
Figura 9. Sistema de Variação da Resistência com Relés Temporizados.	25
Figura 10. Forma de onda na entrada e saída de um acionamento ACVV.....	26
Figura 11. Forma de onda na saída do tiristor durante a frenagem.	27
Figura 12. Soft-starter com tiristores.....	27
Figura 13. Esquema do acionamento VVVF.....	28
Figura 14 Senóide gerada por um inversor.....	29
Figura 15. Comparativo das características de operação de diferentes acionamentos.	30
Figura 16 Máquina de tração de ímãs permanentes GTW2.	31
Figura 17. Operação do elevador com sistema comum e com sistema regenerativo.	32
Figura 18. Sistema inversor com frenagem dissipativa.	33
Figura 19. Diagrama de sistema equipado com frenagem regenerativa.....	34
Figura 20. Quadro de comando equipado com unidade regenerativa.	34
Figura 21. Inversor PWM bidirecional.....	35
Figura 22. Exemplo de quadro de força.	40
Figura 23. Conexão do Fluke 435 para o circuito principal 40	40
Figura 24 Conexão do Fluke 435 para o circuito auxiliar.	41
Figura 25 Potência ativa durante a viagem padrão – Elevador A.	42
Figura 26 Corrente de pico durante o percurso – Elevador A.	42
Figura 27. Máquina de Tração de Indução – Elevador A.....	42
Figura 28. Analisador de Energia Instalado – Elevador A.	43
Figura 29. Quadro de Comando Elevador A.	43
Figura 30. Potência ativa durante a viagem padrão – Elevador B.....	44
Figura 31. Corrente RMS durante viagem padrão – Elevador B.....	44
Figura 32. Potência ativa durante a viagem padrão – Elevador C.....	45
Figura 33. Corrente de pico durante a viagem padrão – Elevador C.....	45
Figura 34. Casa de Máquinas Elevador C.	46
Figura 35. Analisador de Energia Instalado – Elevador C.	46
Figura 36. Motor do Elevador C.....	47
Figura 37. Potência ativa durante viagem padrão – Elevador D.	48
Figura 38. Corrente RMS durante viagem padrão – Elevador D.	48
Figura 39. Casa de Máquinas Elevador D.	48
Figura 40. Quadro de Comando Elevador D, Lado 1.....	49
Figura 41. Quadro de Comando Elevador D, Lado 2.....	49
Figura 42. Motor e Máquina de Tração Elevador D.....	50

Figura 43. Potência ativa durante viagem padrão – Elevador E.....	51
Figura 44. Corrente RMS durante viagem padrão – Elevador E.....	51
Figura 45. Casa de Máquinas - Elevador E.	51
Figura 46. Quadro de Comando - Elevador E.	52
Figura 47. Analisador de Energia - Elevador E.....	52
Figura 48. Gráfico de Demanda de Viagem por Elevador.	53
Figura 49. Gráfico Potência em Standby do circuito principal.	53
Figura 50. Gráfico de potência em standby por elevador.....	54
Figura 51 Gráfico de demanda total por elevador	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Categorias de uso para elevadores.....	37
Quadro 2. Classes para demanda em standby.....	38
Quadro 3. Classes para demanda de viagem.	38
Quadro 4. Classificação energética total do elevador.....	39
Quadro 5. Dados do Elevador A.....	41
Quadro 6. Dados do Elevador B.....	44
Quadro 7. Dados do Elevador C.....	45
Quadro 8. Dados do Elevador D.....	47
Quadro 9. Dados do Elevador E.....	50
Quadro 10. Comparativo de consumo entre os modelos estudados.	56

LISTA DE ABREVIATURAS

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

VDI: Verein Deutscher Ingenieure

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

LED: Light Emitting Diode

PID: Controlador Proporcional Integral Derivativo

ACVV: *Alternate Current Variable Voltage*

VVVF: *Variable Voltage Variable Frequency*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O consumo de energia de elevadores é bastante difícil de estipular de forma simplificada. Como elevadores são produtos customizáveis, ou seja, sistemas especificamente projetados para as necessidades de cada prédio, são várias as características técnicas e de uso que influem no consumo final. A literatura em relação a este assunto não é consistente, pois existem poucos estudos concluídos. Tipicamente em edifícios modernos os elevadores são responsáveis por 3-5% do consumo total de energia (Al-Sharif 2004a). O percentual não é alto, porém a quantidade de elevadores torna este consumo significativo, estima-se que existem em operação no Brasil mais de 280 mil elevadores. Levando em consideração as atuais projeções de crescimento populacional, aumento da densidade demográfica e maior ênfase dada ao consumo de energia no mundo, espera-se que, seguindo modelos já implementados em países mais desenvolvidos nestes aspectos, as agências reguladoras criem normas e regulações que fiscalizem o consumo de cada equipamento, de forma a incentivar um mercado mais eficiente.

A motivação deste trabalho é de se obter dados ainda pouco explorados, mas cada vez mais importantes sobre o consumo dos equipamentos no mercado brasileiro de elevadores.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar medidas do consumo de energia de diferentes modelos e tecnologias de elevadores e estudar as alternativas disponíveis no mercado. A medição será feita em conformidade com o documento VDI 4707, elaborado e utilizado na Alemanha, atualmente em estudo pela ANEEL para implementação no Brasil. Espera-se determinar as características que são mais relevantes na eficiência energética de cada modelo e o custo benefício de possíveis adaptações disponíveis para o consumidor.

1.3. Considerações Históricas

A tecnologia aplicada nos elevadores evoluiu rapidamente nas últimas décadas. A iluminação a LED substituiu as lâmpadas fluorescentes nas cabinas e incandescentes nas botoeiras e indicadores, os motores de corrente contínua foram substituídos por motores de indução, atualmente os motores de ímãs permanentes ocupam sua parcela do mercado. Avanços na tecnologia de acionamento de motores consolidaram o inversor de frequência como padrão da indústria de elevadores, deixando para trás outros métodos menos eficientes e desconfortáveis. A geração de energia a partir do movimento do elevador se tornou realidade, e o desenvolvimento de softwares inteligentes colaborou na redução do tempo de espera e do consumo de energia.

Ao contrário do que acontece com outros equipamentos, elevadores antigos muitas vezes continuam exercendo a sua função de forma satisfatória e segura. Os transtornos que seriam causados, o custo elevado do equipamento e as poucas vantagens percebidas pelo consumidor desestimulam a modernização de elevadores antigos. Resultado disso é que existem equipamentos de todos os modelos produzidos nas últimas cinco décadas ainda operando regularmente com grande potencial de aumento de eficiência energética e conforto.

1.4. Organização do Trabalho

Após a introdução do trabalho, no capítulo 2 é feita uma descrição do funcionamento e dos componentes de um típico elevador de transporte de passageiros.

No capítulo 3 é explicado o método utilizado para determinar o consumo diário de um elevador, baseado na norma VDI 4707.

No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos com as medidas realizadas e a estimativa de consumo diário.

No capítulo 5 tem-se os cálculos de custo e demais comparativos entre diferentes tecnologias.

O capítulo 6 é composto pelas conclusões do trabalho.

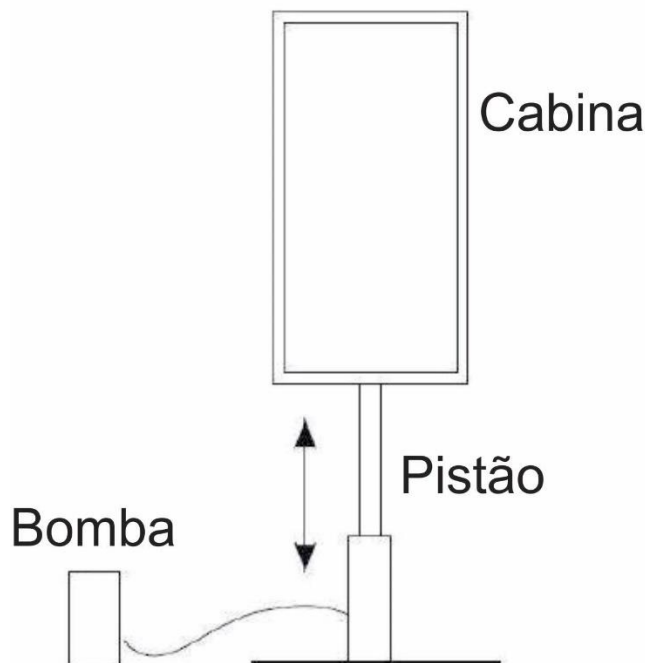
2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DE ELEVADORES

2.1. Elevadores Hidráulicos e de Tração

Todos os elevadores de passageiro têm características em comum, entre elas a cabina, as portas, as guias, a iluminação e seus dispositivos de segurança. A primeira separação que pode ser feita é entre elevadores hidráulicos e de tração.

Os elevadores hidráulicos se locomovem através de uma bomba que injeta óleo em um pistão instalado entre o fundo do poço e a estrutura da cabina, conforme figura 1. Estes elevadores são muito comuns nos Estados Unidos, em prédios de pequeno porte. No Brasil o modelo hidráulico não é popular, com base em estudo realizado pela ThyssenKrupp Elevadores, mais de 98% dos elevadores instalados no Brasil são do tipo de tração.

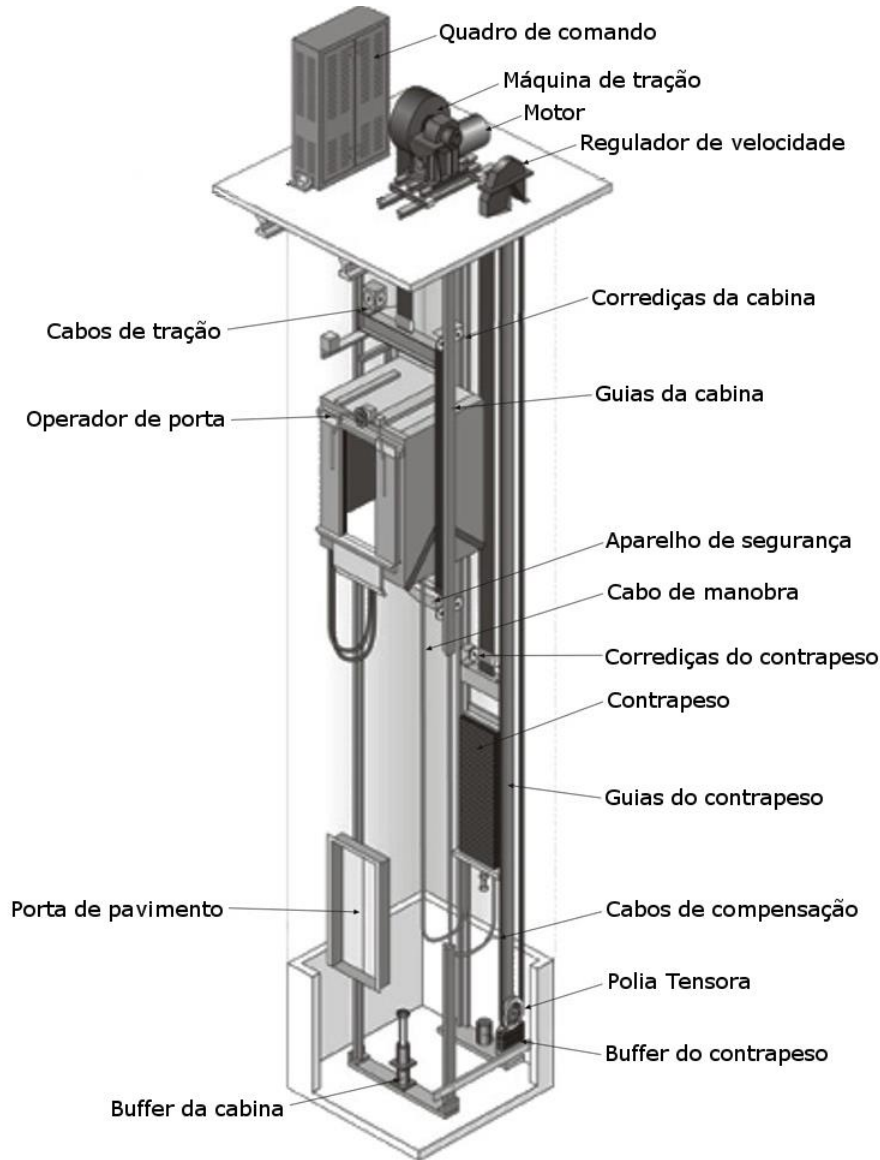
Figura 1. Elevador Hidráulico.



Fonte: (Patrão, 2009)

Nos elevadores tracionados a cabina é suspensa por cabos de aço que passam por uma polia controlada por um motor elétrico. O peso da cabina é balanceado por um contrapeso, conforme figura 2. A massa do contrapeso é de 40 a 50% da massa da cabina e seu principal propósito é garantir um potencial energético constante no sistema e uma tração adequada nos cabos de aço. Como o foco deste trabalho é o mercado de elevadores no Brasil, será dada uma ênfase maior para os elevadores tracionados.

Figura 2. Elevador de Tração.



Fonte: Adaptado pelo autor.

2.2. Engrenado ou não engrenado

A primeira distinção a ser feita entre as máquinas de tração é entre as engrenadas e as não engrenadas.

Em elevadores não engrenados, a polia por onde passam os cabos de aço está conectada diretamente ao eixo do motor. Em geral este sistema é utilizado em prédios mais altos e está associado a velocidades de deslocamento mais altas. Por ser mais compacto, o sistema não engrenado é utilizado também nos elevadores sem casa de máquinas. Por não

utilizarem caixa de redução, não necessitam lubrificação e são mais eficientes energeticamente.

No caso dos elevadores engrenados a polia é conectada em uma caixa de redução que é ligada ao motor. O sistema engrenado é utilizado para adequar motores cuja faixa ideal de operação é muito alta para o transporte de passageiros. Um exemplo dessa aplicação é o caso em que um motor de indução é acionado por partida direta, a rotação do motor fica próxima de 1700 rpm, tornando impraticável conectá-lo diretamente à polia de tração do elevador. Neste caso é utilizada a caixa de redução, com um fator de redução apropriado para a velocidade nominal desejada na cabina. Os motores engrenados são mais baratos, porém a utilização da caixa de redução agrega ao sistema uma ineficiência de aproximadamente 30% (Enermodal 2004). Na figura 8 é possível observar as diferenças aqui descritas.

2.3. Motores e Acionamento

2.3.1 Motores de Corrente Contínua

A máquina de corrente contínua de forma simplificada é formada por um campo (estático) e uma armadura (girante). O campo é formado pelos enrolamentos do estator sendo o responsável pela geração do fluxo magnético principal Φ . A armadura é formada pelo rotor, seus enrolamentos e o conjunto de escovas e coletor. Durante a operação o motor é percorrido por duas corrente I_f e I_a respectivamente no campo e na armadura. A corrente elétrica é fornecida para a armadura através das escovas e do coletor. Enquanto a corrente de excitação I_f é aplicada diretamente ao campo, corrente esta responsável pela produção do fluxo magnético principal (Fuentes, 2005). Uma máquina de tração de corrente contínua pode ser observada na figura 3.

Figura 3. Motor de Corrente Contínua para Elevadores.



A vantagem dos motores CC é a simplicidade do seu controle de velocidade, que pode ser feito variando a tensão no enrolamento do estator e da armadura. Entre os pontos negativos da aplicação destes motores em relação aos motores de corrente alternada está o seu custo mais elevado e a necessidade de manutenções mais frequentes.

Com a evolução da tecnologia de controle de motores de corrente alternada o motor de corrente contínua caiu em desuso na indústria de elevadores, porém existem modelos operando normalmente. São encontrados nos elevadores dois diferentes tipos de acionamento, que serão abordados a seguir.

2.3.1.1. Conjunto Motor Gerador

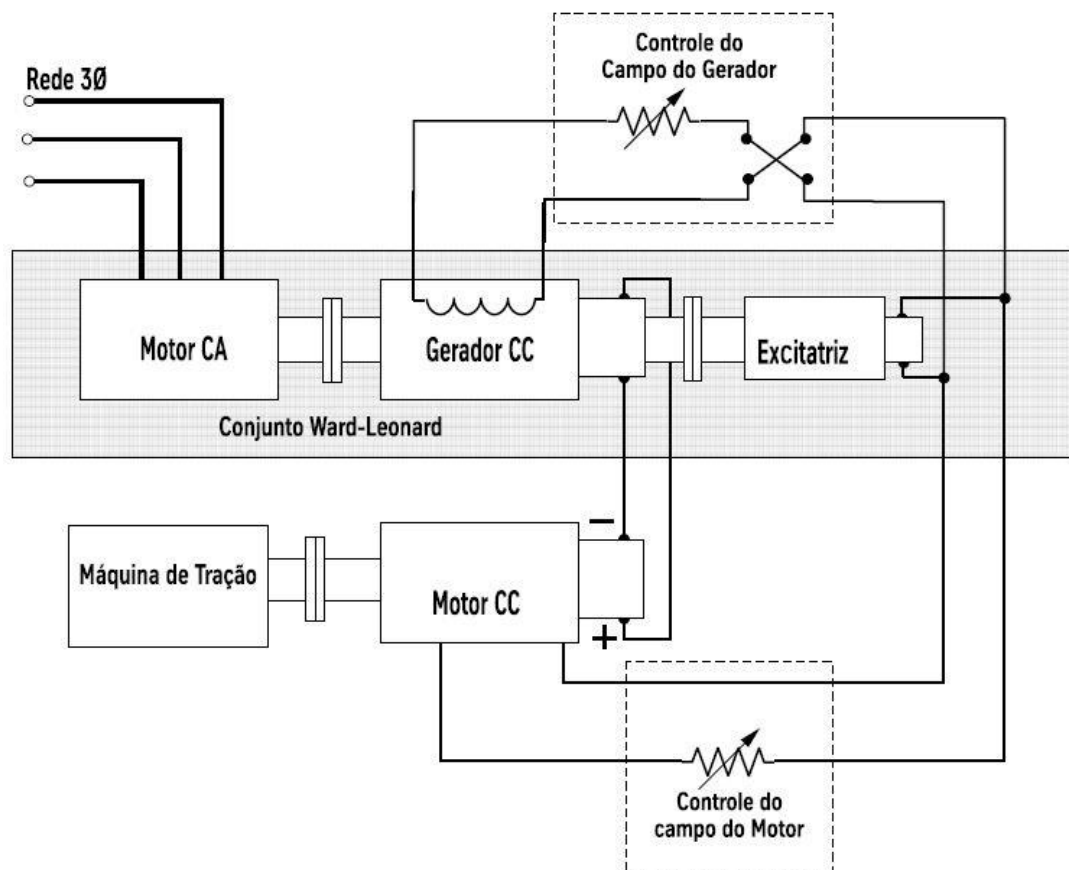
Neste sistema, também chamado de conjunto Ward-Leonard, a energia trifásica do edifício é aplicada em um motor de corrente alternada, o motor é acoplado mecanicamente através de seu eixo a um gerador de corrente contínua, que por sua vez fornece energia para o motor de corrente contínua do elevador, através de sua armadura. No mesmo eixo está acoplada também uma excitatriz, cuja função é excitar o enrolamento de campo do motor e gerador de corrente contínua, conforme figura 4.

O controle de velocidade é feito através da variação da resistência do enrolamento de campo do gerador. A velocidade do motor de corrente alternada e a corrente de campo do

motor do elevador se mantém constantes. Para inverter o sentido de movimento do elevador, a polaridade da tensão de campo fornecida ao motor é invertida.

A vantagem deste sistema é o controle de velocidade preciso e suave. Porém seu custo é bastante elevado, a necessidade de se adquirir duas máquinas extras apenas para o acionamento do motor, somado aos gastos com a manutenção e o alto consumo de energia tornam este sistema uma alternativa ultrapassada. São raros os elevadores que ainda utilizam este acionamento, quase a totalidade já foi modernizada para a tecnologia Controle C.C ou passou a utilizar máquinas de corrente alternada.

Figura 4. Conjunto Motor Gerador.

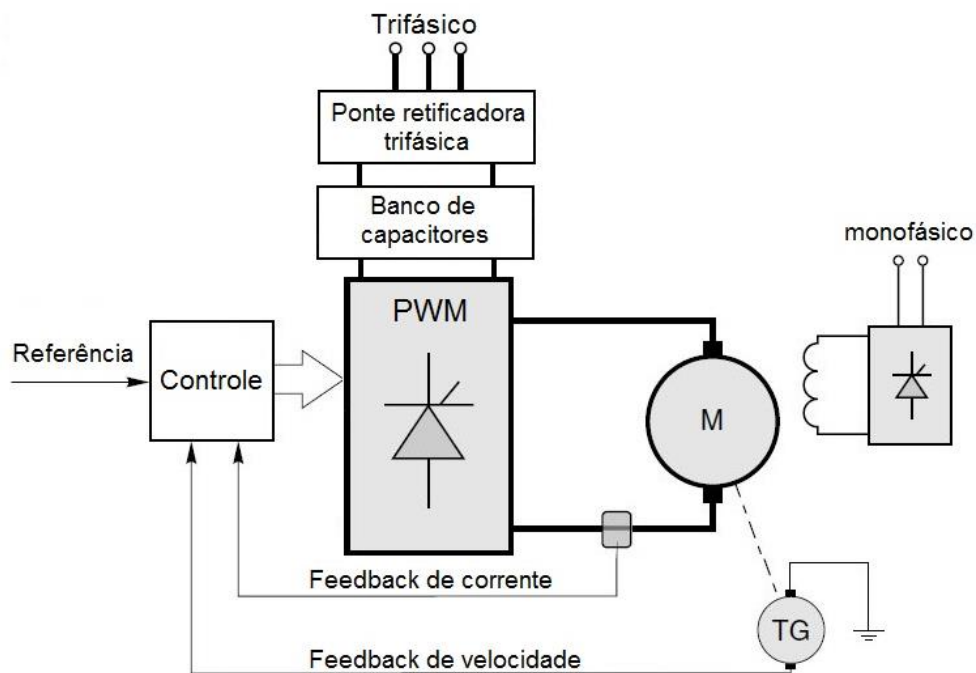


2.3.1.2. Controle C.C

Neste sistema a tensão alternada da rede é retificada e aplicada em um banco de capacitores. O controle da tensão aplicada nos terminais da armadura do motor é feito através do chaveamento de dois transistores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), enquanto o controle da tensão nos terminais do enrolamento de campo é feito através do

chaveamento de um único IGBT. São utilizados dois IGBT's na armadura para permitir a aplicação de tensões positivas e negativas, possibilitando a operação da máquina em ambos sentidos. O acionamento dos transistores é feito através da modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* ou PWM). “PWM refere-se a transformação de uma variável contínua em um sinal binário alternante entre dois valores extremos” (BORLE, 1999). Um encoder ou taco gerador é utilizado para realimentação do sistema de controle, a corrente na armadura do motor também é monitorada. A figura 5 ilustra o funcionamento do circuito.

Figura 5. Controle C.C.



Fonte: Autor.

Alguns cuidados devem ser tomados ao controlar uma carga indutiva através de um PWM. Quando uma indutância L transporta uma corrente I , a energia armazenada no campo magnético W é dada por

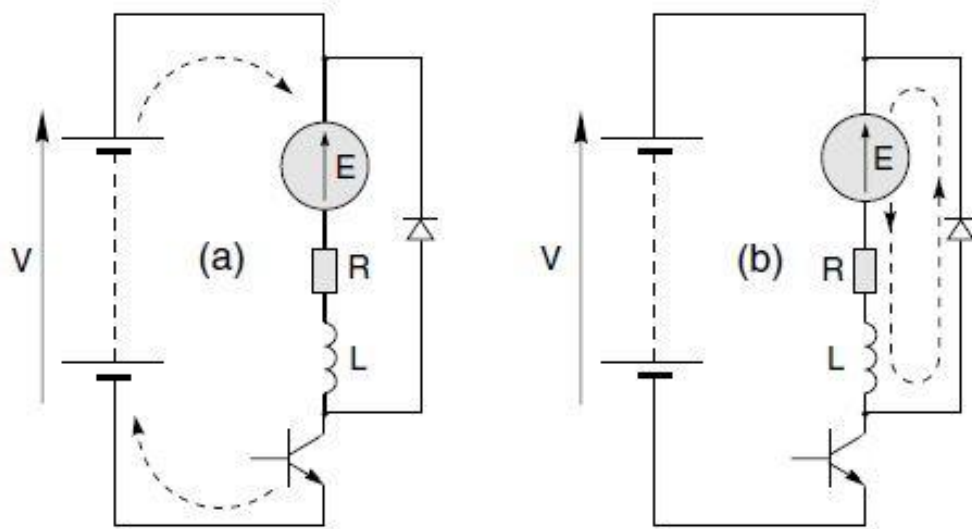
$$W = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.1)$$

E a tensão nos terminais do indutor é

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Para evitar o surgimento de altas tensões induzidas no circuito, é utilizado um diodo roda livre, cuja finalidade é dissipar a energia armazenada no campo magnético no período em que o fornecimento de energia é interrompido, conforme figura 6. Em (a) o transistor está conduzindo e a corrente na armadura flui através da fonte de alimentação. Em (b) o transistor está cortando e a corrente na armadura flui através do diodo.

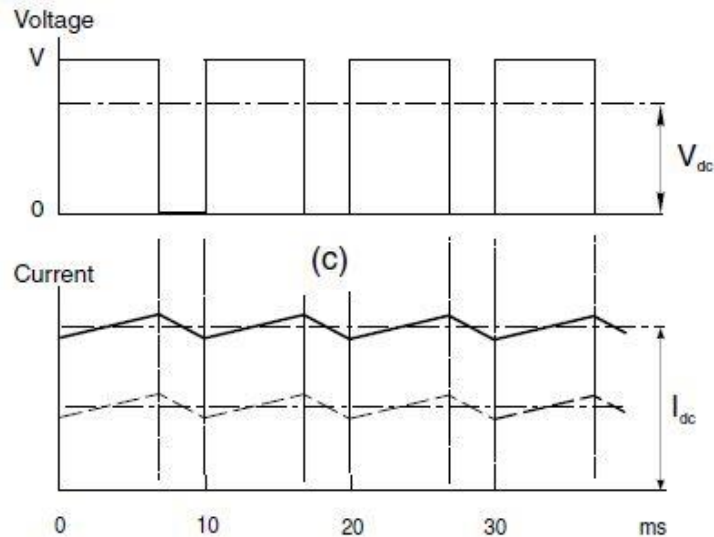
Figura 6. Moto CC alimentado por PWM.



Fonte: (Hughes, 2006).

Apesar de a tensão aplicada variar instantaneamente, a característica indutiva da carga faz com que a corrente na armadura não oscile muito, desde que a frequência de chaveamento seja suficientemente alta, conforme figura 7. Desta forma o conjugado gerado também não oscila, evitando problemas de vibração na cabina.

Figura 7. Característica da tensão e corrente na armadura.



Fonte: (Hughes, 2006).

Um dos pontos negativos deste método de acionamento se manifesta quando há a necessidade de operar o motor em velocidades reduzidas, por exemplo, durante a parada do elevador. Com o PWM fornecendo uma tensão média baixa para a armadura e, portanto, operando desligado na maior parte do ciclo, o conteúdo harmônico fornecido aumenta, trazendo problemas de aquecimento no enrolamento do motor. Este problema costuma ser amenizado com o uso de ventilação forçada. São utilizados filtros de linha na entrada do quadro de comando para filtrar as harmônicas, evitando problemas de interferência nas demais instalações do edifício.

Aproximadamente 2% dos elevadores em operação possuem este tipo de acionamento.

2.3.2 Motor de Indução Trifásico

Em motores de indução o enrolamento de campo, localizado no estator, é constituído por um conjunto de espiras instaladas em ranhuras, de forma que quando alimentadas por uma fonte de tensão trifásica, produzem um campo magnético girante no rotor. Existem dois tipos diferentes de rotor, o mais utilizado no ramo de elevadores é denominado gaiola de esquilo. Este rotor é constituído por condutores retilíneos interligados nas duas extremidades por anéis de curto circuito.

O campo girante produzido no estator passa pelos anéis do rotor e induz neles uma tensão. A tensão induzida no rotor produz uma corrente que por sua vez cria um campo magnético no rotor. A interação entre o campo magnético do rotor e o campo do estator cria um conjugado dado por:

$$C = k \cdot B_{rotor} \times B_{estator}$$

Onde:

C é o conjugado induzido no rotor [Nm];

k é uma constante;

B_{rotor} é a densidade de campo magnético induzido no rotor [T];

$B_{estator}$ é a densidade de campo magnético produzido no estator [T];

A produção do conjugado é dependente da variação do fluxo magnético através do rotor, caso o rotor atinja a velocidade síncrona, não há conjugado. Portanto a velocidade do rotor é sempre inferior à velocidade síncrona, e pode ser descrita por:

$$n_m = (1 - s) \cdot n_s$$

$$s = \frac{(n_s - n_m)}{n_s}$$

Onde:

n_m é a velocidade de rotação do rotor [rpm];

n_s é a velocidade síncrona [rpm];

s é o escorregamento da máquina;

A velocidade síncrona por sua vez, é dada por:

$$N_s = 120 \cdot \frac{f}{p}$$

Onde:

f é a frequência da tensão fornecida ao estator[Hz];

p é o número de polos do motor;

O controle de velocidade de um motor de indução com rotor gaiola de esquilo pode ser feito através da variação da tensão e frequência no enrolamento de campo, ou através da mudança do número de polos no estator.

Quando utilizados em elevadores, os motores de indução com máquina engrenada são utilizados em velocidades de $1m/s$ até $1,75m/s$, são associados a uma eficiência de 60 a 70%. Em máquinas não engrenadas a velocidade pode ser de $1m/s$ até $6 m/s$ e sua eficiência é de 70 a 89%.

Figura 8. Motor de Indução engrenado (esquerda) e não engrenado (direita).



Fonte: Thyssenkrupp Aufzugswerke GmbH.

2.3.1.3. AC2

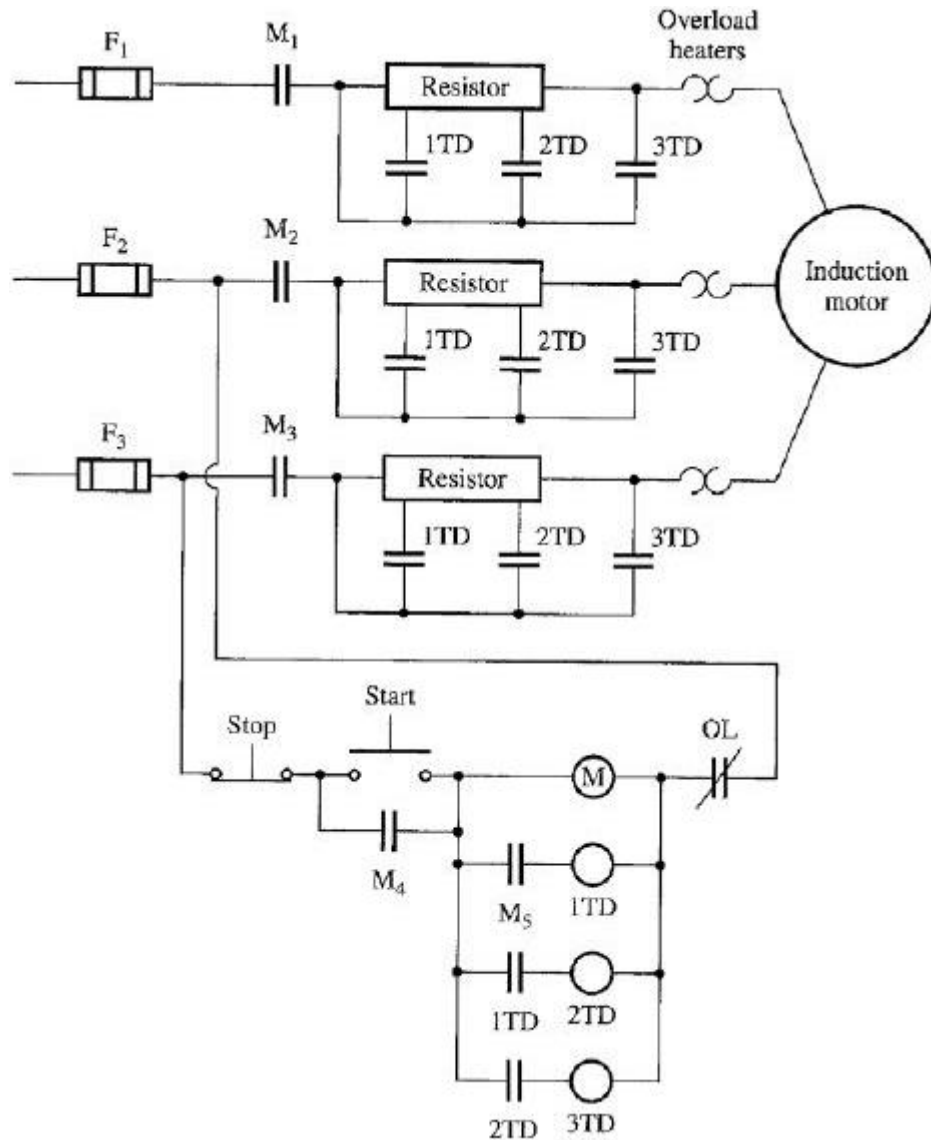
No sistema AC2 o motor de indução possui dois enrolamentos estáticos, possibilitando assim duas velocidades distintas. O primeiro enrolamento corresponde à velocidade nominal do elevador, também chamado enrolamento de alta, e o segundo corresponde a 25% da velocidade nominal do elevador.

No momento em que o elevador parte o motor é acionado diretamente no enrolamento de alta, permanecendo ligado até o momento da redução, que é detectado por sensores na caixa de corrida, quando o elevador está a uma distância de 1 a 1,5 metros do pavimento de

destino. A distância de redução depende da velocidade do elevador. Neste ponto é feita a comutação, desligando-se o enrolamento de alta e ligando-se o enrolamento de baixa velocidade. Ao chegar no ponto de nivelamento o elevador para, desligando o motor e acionando o freio.

A troca do enrolamento de alta para o de baixa, provoca uma mudança repentina no conjugado aplicado pelo motor, que é desconfortável para o usuário do elevador. Para tornar mais suave a troca entre enrolamentos uma solução comum é utilizar um volante de inércia. O volante de inércia é um disco de massa elevada, tipicamente feito de aço, acoplado ao eixo da máquina de tração, que armazena energia na forma de energia cinética. Outro método praticado envolve o aumento gradual da resistência conectada ao enrolamento de campo, reduzindo o conjugado e a velocidade do motor, nestes casos, a resistência variável também é utilizada para aumentar o conforto na partida. Conforme figura 9, no momento da partida o relé M é energizado, causando o fechamento dos contatos M₁, M₂, M₃ e energizando o relé temporizado TD1. Portanto o resistor atua de forma plena e a corrente de partida é reduzida. Após um intervalo de tempo configurável, o relé TD1 fecha, reduzindo a resistência entre o motor e a alimentação e energizando o relé temporizado 2TD. O processo se repete até que toda a resistência seja removida. Da mesma forma, durante a frenagem, passo a passo a resistência volta a ser aplicada, reduzindo a corrente no motor.

Figura 9. Sistema de Variação da Resistência com Relés Temporizados.



Fonte: (Chapman, 2005).

A corrente de partida do sistema AC2 é cerca de 5 a 6 vezes a corrente nominal do motor. A alta corrente de partida pode causar oscilações na tensão da rede, possivelmente prejudicando o desempenho de outros equipamentos em uso no edifício.

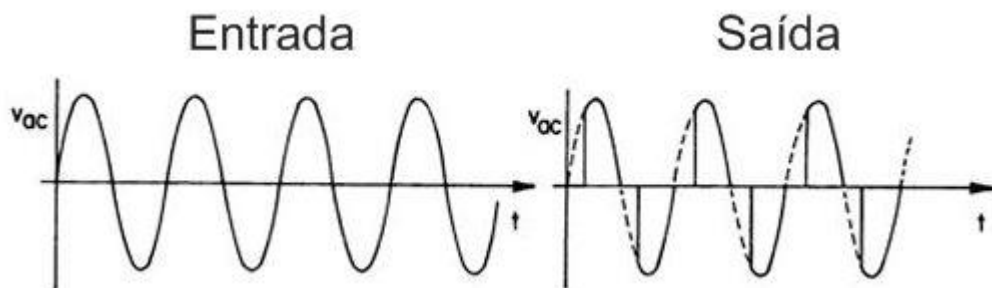
Cerca de 27,5% dos elevadores de passageiro no Brasil em atividade fazem uso deste tipo de acionamento.

2.3.1.4. ACVV

O sistema ACVV (*Alternate Current Variable Voltage*), assim como o AC2, também utiliza dois enrolamentos estáticos, um de alta utilizado na partida e durante o

deslocamento, e o de baixa, acionado durante a redução e nivelamento. A diferença em relação ao AC2 é a existência de um controle de potência eletrônico, constituído por três pares de tiristores na configuração *back-to-back* conforme figura 12. A velocidade do motor é controlada a partir da tensão aplicada nos terminais trifásicos do estator, que por sua vez depende do ângulo de disparo nos tiristores. Um circuito detecta a passagem da tensão de entrada por zero, após um tempo determinado pelo software de controle, o tiristor é acionado, de forma que apenas uma parte de cada semiciclo de onda alimenta a carga, conforme figura 10.

Figura 10. Forma de onda na entrada e saída de um acionamento ACVV.



Fonte: (Ramshaw, 2012)

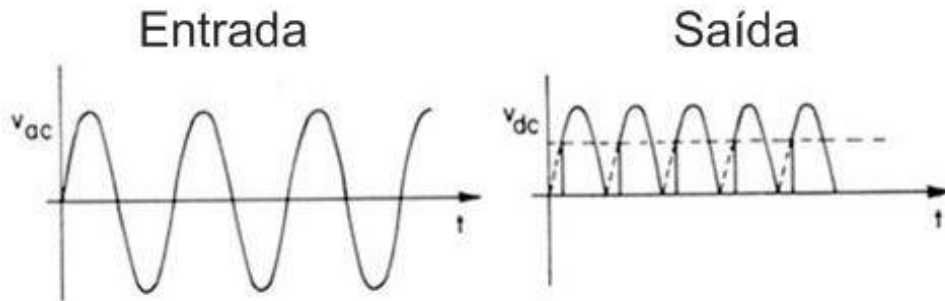
A velocidade desempenhada pelo motor é medida em tempo real através de um tacômetro ou encoder. A diferença entre curva de velocidade medida e a curva padrão de velocidade é utilizada pelo controle do elevador para reajustar o ângulo de disparo dos tiristores.

Este sistema caracteriza-se por manter uma alta corrente de partida, na ordem de 4 a 5 vezes a corrente nominal, e por trabalhar em temperaturas elevadas, em função do alto escorregamento.

A redução de velocidade do elevador é feita através da alteração do padrão de disparo dos tiristores. São criados campos magnéticos estáticos em dois enrolamentos da armadura, criando um conjugado que se opõe ao movimento do rotor de forma controlada, conforme figura 11. No momento em que o elevador alcança o nivelamento com o piso do pavimento, a velocidade está próxima de zero, e o freio mecânico é acionado.

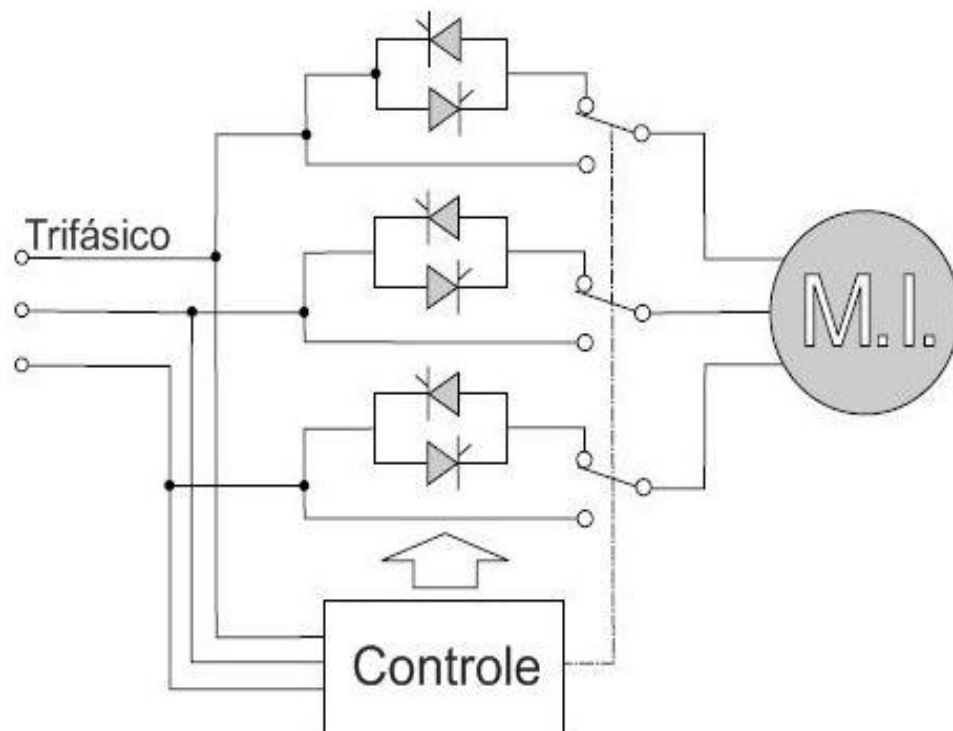
Este acionamento ainda é utilizado em aproximadamente 7,2% dos elevadores de passageiro em atividade no Brasil.

Figura 11. Forma de onda na saída do tiristor durante a frenagem.



Fonte: (Ramshaw, 2012)

Figura 12. Soft-starter com tiristores.



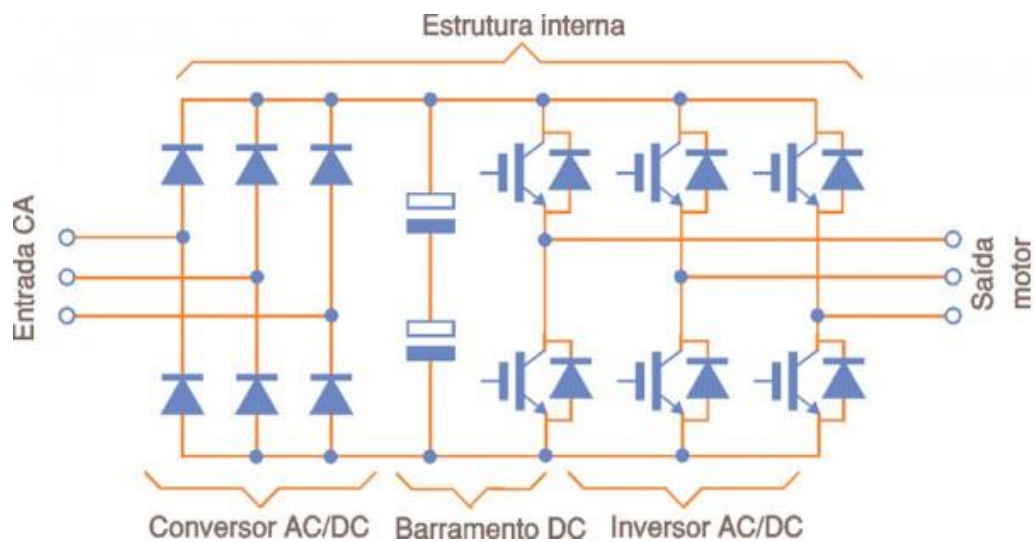
Fonte: (Hughes, 2006)

2.3.1.5. ACVVVF

O sistema ACVVVF (*Alternate Current, Variable Voltage, Variable Frequency*) é utilizado com motores de indução de um único enrolamento. Constituído por um inversor conectado a um banco de capacitores, que é alimentado pela tensão trifásica retificada da

rede. Este sistema permite um controle mais sofisticado da tensão alternada que alimenta os enrolamentos de campo do motor, variando tanto a amplitude quanto a frequência de entrada. A figura 13 exhibe, de forma simplificada, o circuito descrito acima. Verifica-se que os transistores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) conectam o barramento de corrente contínua à saída trifásica que alimenta o motor. Cada fase possui dois transistores em oposição de polaridade, permitindo a aplicação de pulsos positivos e negativos. A função dos diodos é prevenir picos de tensão inversa que ocorrem no chaveamento da corrente que alimenta uma carga indutiva.

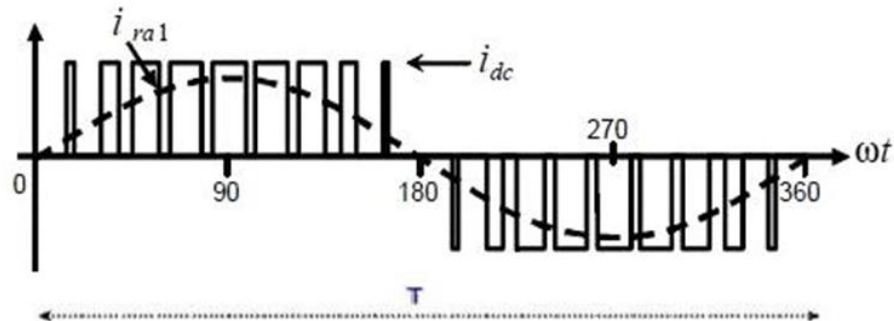
Figura 13. Esquema do acionamento VVVF.



Fonte: www.mecatronicaatual.com.br

As características das senóides aplicadas no motor são controladas a partir dos pulsos disparados no *gate* de cada IGBT. Conforme figura 14, o valor eficaz da forma de onda está relacionado à largura dos pulsos, enquanto a frequência é dependente do período T utilizado. A qualidade do inversor está diretamente relacionada com a frequência de chaveamento, no caso dos elevadores estudados, a frequência de chaveamento é de 8 kHz.

Figura 14 Senóide gerada por um inversor.



Fonte: (Rodríguez, 2005)

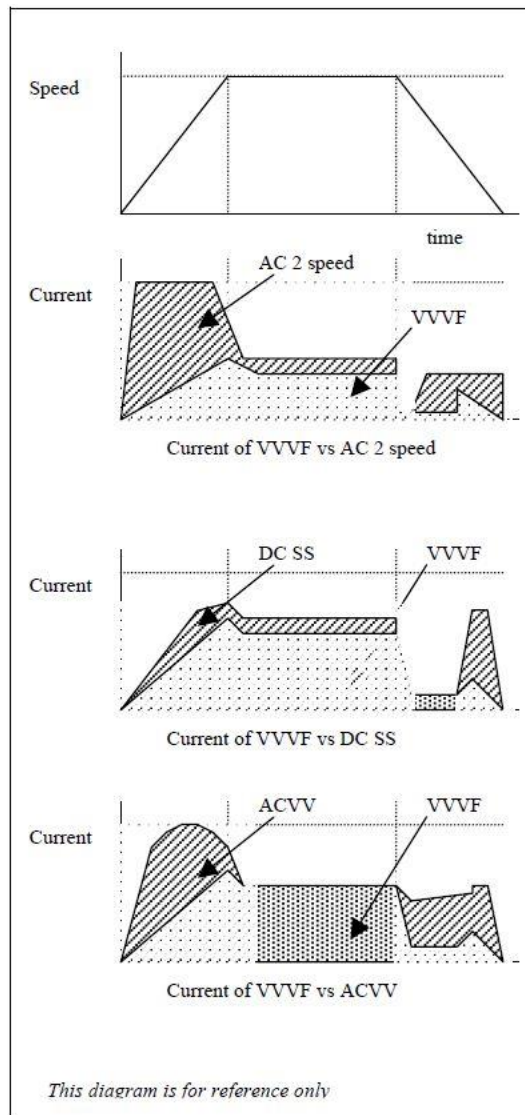
A velocidade do motor é controlada por um PID de parâmetros ajustáveis. Um encoder é utilizado para acompanhar a velocidade desempenhada em tempo real e assim realimentar o controlador.

O acionamento VVVF pode ser dividido em escalar e vetorial. O VVVF escalar, de forma simplificada, mantém a relação da tensão eficaz com a frequência constante, enquanto aumenta as duas variáveis gradualmente até ser atingida a velocidade nominal. O método escalar é de simples implementação, mas possui a desvantagem de que a velocidade e conjugado aplicado variam conforme a região de operação do motor, e seu desempenho é ruim em velocidades muito abaixo da frequência da rede. No controle vetorial as correntes do estator são representadas por vetores (d,q), a componente d produz o fluxo magnético, enquanto a componente q produz conjugado. O controle vetorial permite excelente desempenho e conforto em todas as faixas de operação do motor, no caso do elevador, podendo manter conjugado elevado e constante em baixas velocidades, nivelamento preciso e aceleração controlada.

Em elevadores sem caixa de redução, o conjugado aplicado no momento da partida é calculado também com base no peso da carga a ser transportada, que é medida por uma célula de cargas instalado na parte inferior da estrutura da cabina. Quando esta variável a mais de controle não é utilizada, ou está mal ajustada, ocorre o *rollback*, que é um curto deslocamento do elevador no período entre a liberação do freio mecânico e a aplicação de conjugado apropriado por parte do motor.

Com o uso do VVVF a corrente de partida do motor é inferior a duas vezes a corrente nominal, a temperatura do motor se mantém próxima da temperatura ambiente, o ruído produzido é baixo e o conforto no percurso, quando bem ajustado, é ideal. Em suma este acionamento atende todas as necessidades do equipamento, além de ter um custo baixo, por estes motivos todos os quadros de comando produzidos hoje possuem controle VVVF. Aproximadamente 72,3% dos elevadores em atividade possuem este tipo de acionamento. A figura 15 exibe um comparativo qualitativo entre os acionamentos até aqui descritos.

Figura 15. Comparativo das características de operação de diferentes acionamentos.



Fonte: Guidelines on Energy Efficiency of Lift and Escalator Installations.

2.3.3 Motor Síncrono de Imãs Permanentes

Motores síncronos de imãs permanentes possuem enrolamentos no estator, alimentados por tensão trifásica, produzindo um campo magnético girante. A frequência do campo girante é determinada pela tensão de entrada e pelo número de polos. O rotor é feito por imãs permanentes de alto produto magnético, normalmente são utilizados imãs de terras raras, mais especificamente Neodímio Ferro Boro. O conjugado é gerado a partir da interação entre o campo girante criado no estator e o campo natural do imã permanente. A figura 16 mostra uma máquina de tração de imãs permanentes utilizada em elevadores.

Figura 16 Máquina de tração de imãs permanentes GTW2.



Fonte: Autor.

O avanço da eletrônica de potência e a redução significativa dos custos de fabricação de imãs permanentes permitiram que, nos últimos anos, o uso do motor síncrono de imãs permanentes se difundisse por diversas aplicações, entre elas a indústria de elevadores. O custo do motor de imãs permanentes continua superior à um motor equivalente de indução, porém sua eficiência energética, conjugado elevado e alta densidade de potência o tornam uma alternativa competitiva. O tamanho reduzido deste tipo de motor permitiu a criação do elevador sem casa de máquinas, onde o motor é fixado e instalado em um suporte no topo da

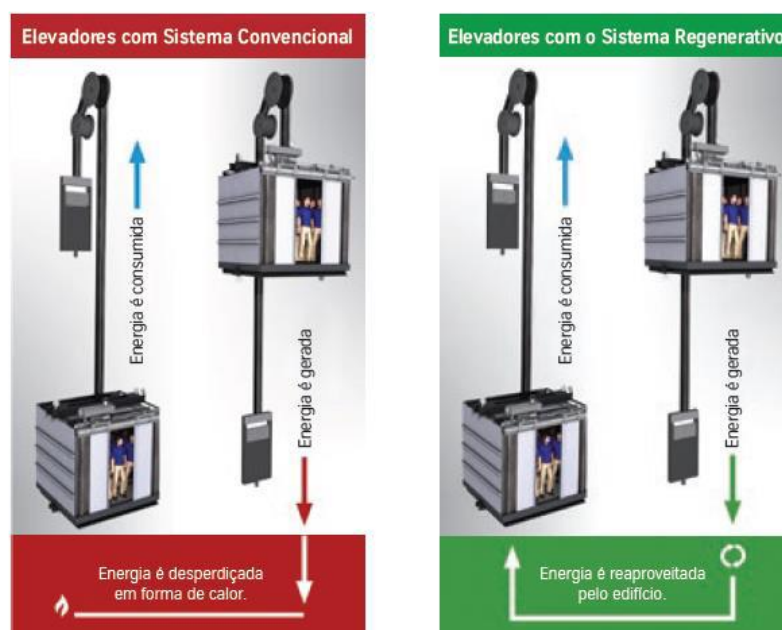
caixa de corrida. Com a eliminação da casa de máquinas, fica disponível para outros fins uma área maior da cobertura do edifício, por este motivo o modelo sem casa de máquinas se popularizou rapidamente.

Os motores de ímãs permanentes são utilizados em todas as velocidades disponíveis, desde 1 m/s até 6 m/s . A eficiência deste tipo de motor pode variar de 80 a 97%. Por não utilizarem caixa de redução, trocas de óleo periódicas não são necessárias. Devido ao seu controle mais complexo, e também por terem se tornado uma alternativa viável após a consolidação do inversor como melhor método de acionamento, todos os equipamentos com motor de ímãs permanentes possuem acionamento VVVF.

2.4. Frenagem Regenerativa

Durante o funcionamento de um elevador, é natural que ocorram situações em que a energia do motor precise ser dissipada. A dissipação de energia pode ocorrer tanto na frenagem quanto quando o elevador está em deslocamento. Como o contrapeso possui o peso da cabina somado com 50% de sua capacidade máxima, sempre que a cabina desce transportando mais de metade da capacidade ou sobe com menos da metade de ocupação, energia potencial está sendo dissipada, conforme figura 17.

Figura 17. Operação do elevador com sistema comum e com sistema regenerativo.

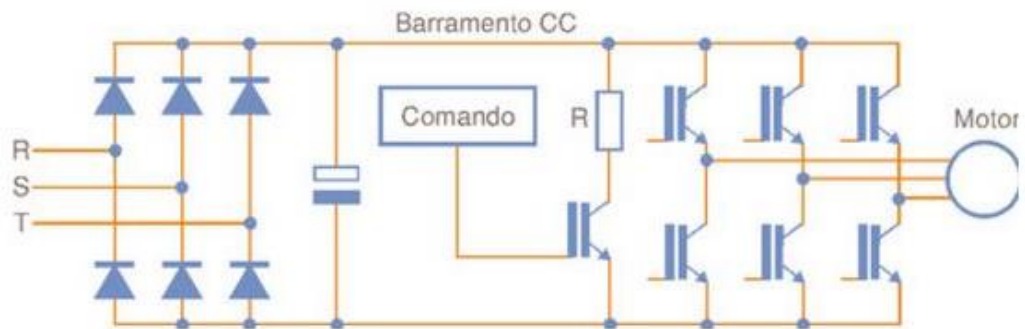


Fonte: Manual unidade regenerativa.

Apesar de o elevador possuir um sistema de freio mecânico, ele é utilizado apenas quando o elevador já se encontra em baixa velocidade, ou em situações atípicas, por exemplo quando é detectada uma falha de segurança, ou então na ocorrência de uma queda de energia.

A solução normalmente utilizada é a frenagem dissipativa. O motor atua como um gerador, convertendo a energia cinética em energia elétrica que, por sua vez, é dissipada em um resistor de frenagem, conectado nos terminais da máquina. O conjugado de frenagem da máquina é controlado por um IGBT, que determina a corrente que flui para o resistor, conforme figura 18.

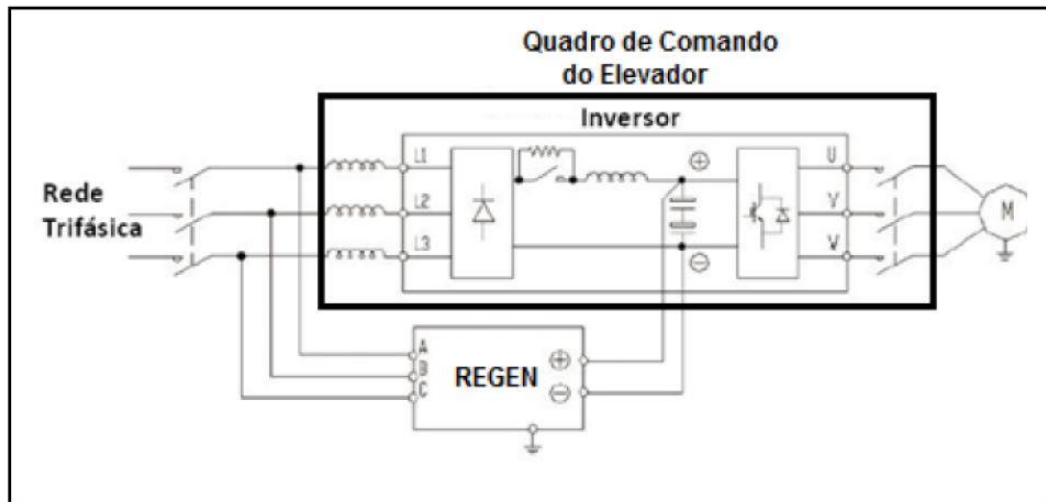
Figura 18. Sistema inversor com frenagem dissipativa.



Fonte: www.mecatronicaatual.com.br.

Para elevadores de médio e grande porte, com fluxo intenso de passageiros, a frenagem regenerativa é uma opção a ser considerada. Nesta configuração, a energia gerada pelo motor durante a frenagem, é conduzida para um módulo externo, conforme figuras 19 e 20. A energia gerada é sincronizada e devolvida para a rede de alimentação.

Figura 19. Diagrama de sistema equipado com frenagem regenerativa.



Fonte: Manual da unidade regenerativa.

Figura 20. Quadro de comando equipado com unidade regenerativa.



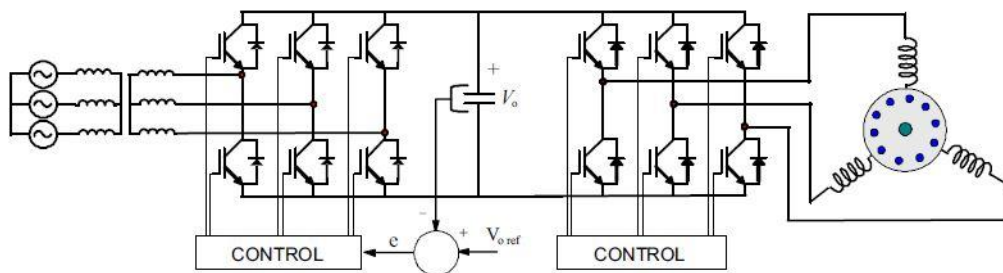
Fonte: Autor.

Em condições ideais, ou seja, com a cabina subindo vazia ou descendo cheia, a economia de energia obtida com a unidade regenerativa é de aproximadamente 40%. A economia real obtida depende das características do elevador e do comportamento dos seus usuários, mas costuma variar entre 20 e 35%.

O sistema de frenagem regenerativa descrito acima é apenas um dos métodos existentes, e é também o método utilizado no elevador que teve seu consumo analisado na realização deste trabalho. É possível encontrar em outros elevadores, um sistema mais compacto, utilizado apenas em quadros de comando que possuem frenagem regenerativa de fábrica, e não como um módulo externo, como é o modelo descrito anteriormente.

Seu funcionamento é baseado em um inversor que opera nos quatro quadrantes. A principal diferença é de que o banco de capacitores é carregado através de um retificador PWM trifásico, conforme figura 21, com topologia idêntica a de um inversor, e não por uma ponte retificadora passiva. Para devolver energia para a rede, o controle do PWM se altera, o bloco retificador passa a ser um inversor em sincronia com a rede, aproveitando a energia acumulada no banco de capacitores.

Figura 21. Inversor PWM bidirecional.



Fonte: (Rodríguez, 2005).

3. CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ELEVADORES.

3.1. Origem do Método

Em Dezembro de 2002 o parlamento europeu aprovou a diretiva 2002/91/CE, relativa ao desempenho energético de edifícios. O objetivo desta diretiva é de estabelecer a aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético de novos edifícios, ou edifícios sujeitos a relevantes obras de renovação, além do enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios existentes. Em 26/05/2007 essa diretiva se tornou lei na Alemanha, e passaram a ser exigidos certificados de eficiência energética de todos os edifícios.

Em linha com a demanda de documentos técnicos na área de eficiência energética, a Associação de Engenheiros Alemães elaborou e divulgou métodos padronizados para auferir a eficiência energética de todos os equipamentos e sistemas que são amplamente utilizados. O documento chamado VDI 4707 descreve o procedimento criado na Alemanha e adotado por outras agências reguladoras, entre elas o INMETRO, para estimar o consumo diário dos elevadores. O VDI 4707 será o método utilizado neste trabalho.

3.2. Demanda em Standby

A demanda em *standby* é a energia total demandada pelo elevador enquanto este se encontra em repouso. Deve ser contabilizada a energia consumida por todos os componentes elétricos do elevador e do quadro de comando assim como a iluminação de cabina. A iluminação da caixa de corrida e da casa de máquinas não é considerada.

O cálculo da demanda em *standby* pode ser feito pela soma individual do consumo dos componentes, desde que este seja conhecido, ou então através de medições no quadro de força. A medição deve ser feita 10 minutos após o término da última viagem, este tempo é dado para ter certeza de que no momento da medição o equipamento tenha acionado seus mecanismos de economia de energia em *standby*.

3.3. Demanda de Viagem

A demanda de viagem é a demanda específica necessária para que o elevador transporte sua carga nominal ao longo de uma determinada distância. Sua unidade de medida é dada em $\frac{mWh}{kg \cdot m}$.

Para obtenção da demanda de viagem de um elevador é feita uma medição do consumo de energia ao longo de uma viagem de referência. A viagem de referência inclui o fechamento da porta do elevador, uma viagem de um extremo ao outro da caixa de corrida, a abertura e fechamento da porta e o retorno ao ponto de partida. Para garantir a precisão da medida é recomendado que se faça mais de uma medição por elevador. Para obter a demanda de viagem, a energia consumida durante a viagem de referência (em Wh) é dividida pela distância percorrida em metros e pela carga nominal do elevador.

3.4. Categorias de Uso

Um dos fatores mais relevantes na determinação do consumo de energia do elevador é o seu uso. A frequência com que o elevador é requisitado pode variar bastante de um caso para o outro e depende essencialmente da sua aplicação. Em elevadores pouco utilizados, o consumo em *standby* é mais relevante no consumo diário, enquanto nos elevadores de uso intenso, a eficiência durante a viagem é mais importante. Para considerar essas diferenças a VDI 4707 utiliza uma tabela com quatro categorias de uso distintas, a diferença entre as categorias é o número de horas por dia em que o elevador está em movimento.

Quadro 1. Categorias de uso para elevadores.

Categoria de uso	1	2	3	4
Intensidade de uso	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Tempo médio de viagem por dia em horas	0,5	1,5	3	6
Tempo médio em standby por dia em horas	23,5	22,5	21	18
Exemplos típicos de edifícios	<ul style="list-style-type: none"> ● Prédio residencial com até 20 apartamentos ● Prédio comercial de até 5 andares ● Hotéis de pequeno porte 	<ul style="list-style-type: none"> ● Prédio residencial com até 50 apartamentos ● Prédio comercial de até 10 andares ● Hotéis de médio porte 	<ul style="list-style-type: none"> ● Prédio residencial com mais de 50 apartamentos ● Prédio comercial com mais de 10 andares ● Hotéis de grande porte ● Hospitais de pequeno e médio porte 	<ul style="list-style-type: none"> ● Prédio comercial com mais de 100m de altura ● Hospitais de grande porte

3.5. Classes de Eficiência Energética

Também no procedimento VDI 4707 são associadas classes aos elevadores com base no seu consumo de energia tanto em *standby* quanto em movimento. São sete classes que vão das letras A até G, onde a letra A corresponde a melhor eficiência energética. Esta classificação permite determinar facilmente se a eficiência medida está em linha com a expectativa das agências reguladoras e serve como comparativo em relação ao que há de mais eficiente no mercado.

Quadro 2. Classes para demanda em *standby*.

Potência [W]	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 800	≤ 1600	> 1600
Classe	A	B	C	D	E	F	G

Quadro 3. Classes para demanda de viagem.

Demanda específica de Energia em mWh/(m·kg)	≤ 0,56	≤ 0,84	≤ 1,26	≤ 1,89	≤ 2,8	≤ 4,2	> 4,2
Classe	A	B	C	D	E	F	G

Uma vez determinado o consumo em *standby* e o consumo durante a viagem, é feito um cálculo do consumo específico do elevador, que leva em consideração a sua categoria de uso, ou seja, o número de horas por dia em que o elevador está ativo. O cálculo pode ser visto na equação (1)

$$D_{total} = \frac{(t_{standby}) \cdot (P_{standby}) + (t_{movimento}) \cdot (v) \cdot (Cap) \cdot (DEV)}{(t_{movimento}) \cdot (v) \cdot (Cap)}$$

Onde:

D_{total} é a demanda total do elevador $\left[\frac{mWh}{kg \cdot m}\right]$;

$t_{standby}$ é o tempo em que o elevador está parado por dia, em horas;

$P_{standby}$ é a potência do elevador em *standby*[W];

$t_{movimento}$ é o tempo que o elevador passa em movimento por dia, em horas;

v é a velocidade nominal do elevador $\left[\frac{m}{s}\right]$;

Cap é a carga nominal do elevador;

DEV é a demanda específica em viagem $\left[\frac{mWh}{m \cdot kg}\right]$;

O resultado obtido indica a demanda específica de energia do elevador, dada em $mWh/kg \cdot m$. Conhecendo este valor e a categoria do elevador, a tabela 4 é construída para definir a classe de eficiência energética do equipamento. Para obter conceito A, o elevador deve possuir no máximo a demanda equivalente da combinação dos conceitos A em *standby* e em viagem, o raciocínio é o mesmo com os demais conceitos. A tabela 4 foi calculada considerando um elevador de carga nominal de 1000kg e velocidade de 1 m / s .

Quadro 4. Classificação energética total do elevador.

Classe de Eficiência Energética	Demanda Específica de Energia em $mWh/(m \cdot kg)$			
	Categoria de uso			
	1	2	3	4
A	$\leq 1,45$	$\leq 1,01$	$\leq 0,9$	$\leq 0,84$
B	$\leq 2,51$	$\leq 1,62$	$\leq 1,39$	$\leq 1,28$
C	$\leq 4,41$	$\leq 2,63$	$\leq 2,19$	$\leq 1,97$
D	$\leq 7,92$	$\leq 4,37$	$\leq 3,48$	$\leq 3,04$
E	$\leq 14,41$	$\leq 7,33$	$\leq 5,56$	$\leq 4,67$
F	$\leq 26,88$	$\leq 12,67$	$\leq 9,11$	$\leq 7,33$
G	$\leq 26,88$	$\leq 12,67$	$\leq 9,11$	$\leq 7,33$

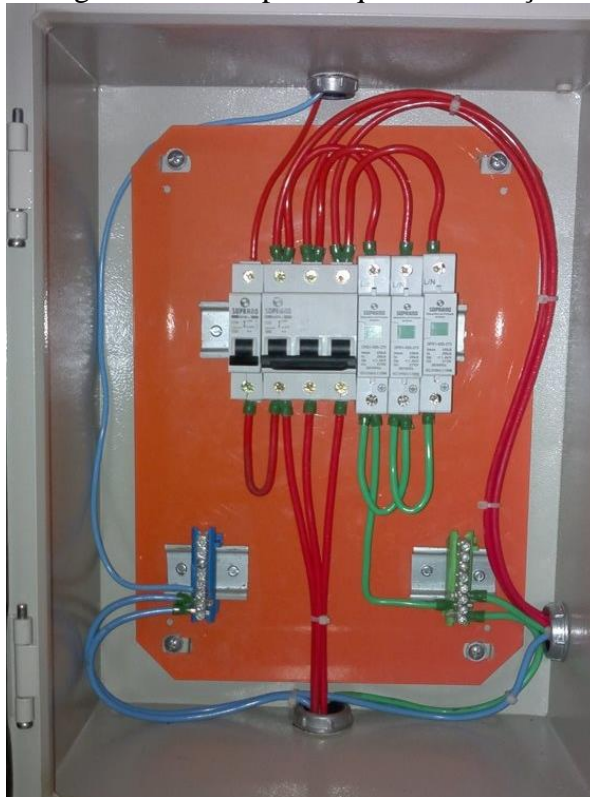
3.6. Equipamento Utilizado

- Fluke 435 Power Logger S/N: S10303355B6

3.7. Local de Medição

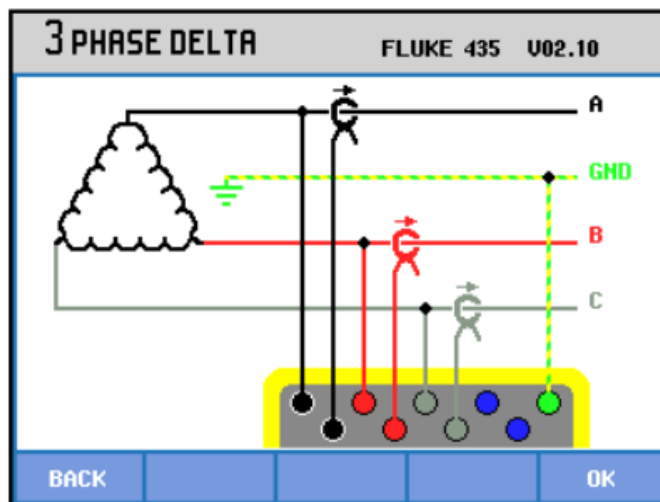
É exigido na norma NBR 5410 que cada elevador tenha um quadro de força individual, onde é instalado um disjuntor trifásico, para o circuito do quadro de comando e máquina de tração, e um disjuntor monofásico ou bifásico para o circuito de iluminação da cabina, ou circuito auxiliar. A figura 22 representa um típico quadro de força encontrado em uma casa de máquinas.

Figura 22. Exemplo de quadro de força.



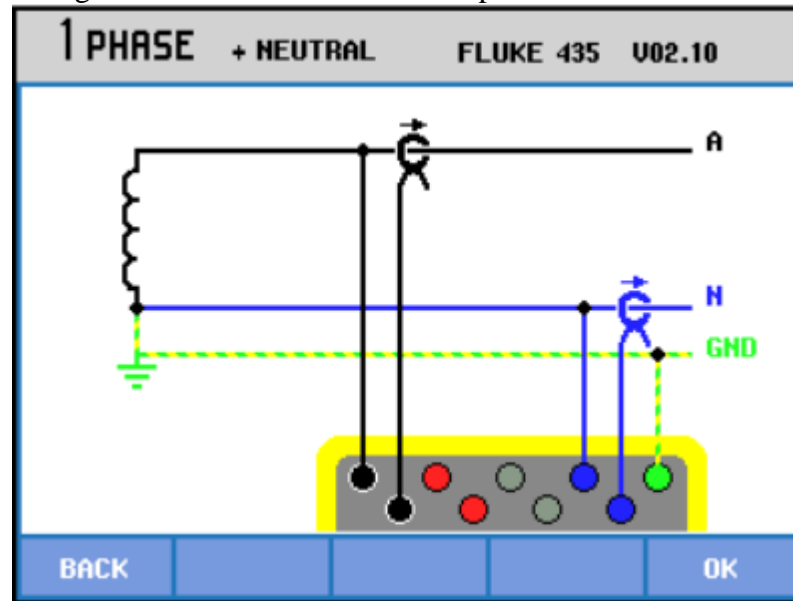
Durante a medição de energia consumida durante a viagem o equipamento será ligado diretamente na entrada trifásica do elevador. Para medir o consumo em *standby* será feita a medida na entrada trifásica e no circuito de iluminação, conforme figuras 23 e 24.

Figura 23. Conexão do Fluke 435 para o circuito principal



Fonte: Autor.

Figura 24 Conexão do Fluke 435 para o circuito auxiliar.



Fonte: Autor.

4. RESULTADOS MEDIÇÕES

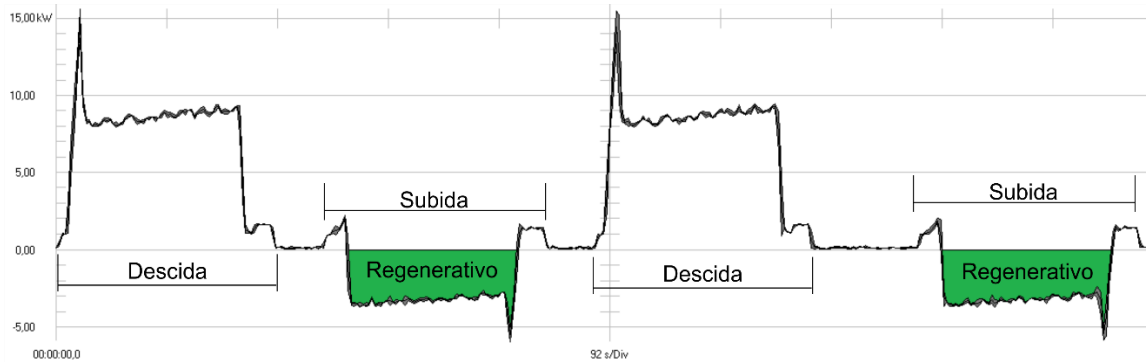
4.1. Elevador A – VVVF Com Frenagem Regenerativa

Quadro 5. Dados do Elevador A.

Acionamento	ACVVVF
Tipo de Motor	Indução
Potência Nominal do Motor	15 kW
Tensão da rede	380 VCA
Capacidade	1400 kg / 18 passageiros
Velocidade da Cabina	1,75 m/s
Número de Paradas	15
Altura de Viagem	50,16 m
Tração	2:1
Frenagem Regenerativa	SIM
Categoria de Uso (VDI 4707)	3
Tempo médio de viagem por dia	3 horas
Potência Standby Circuito Principal	141,56 W
Potência Standby Circuito Auxiliar	137,10 W
Potência Total em Standby	278,66 W
Demanda em Standby	0,221 mWh/kgm
Demanda em Viagem	0,251 mWh/kgm
Demanda Total	0,472 mWh/kgm
Classificação para Demanda Standby	D
Classificação para Demanda em Viagem	A
Classe de Eficiência Energética	A

A figura 25 mostra o comportamento da potência ativa durante o ensaio realizado.

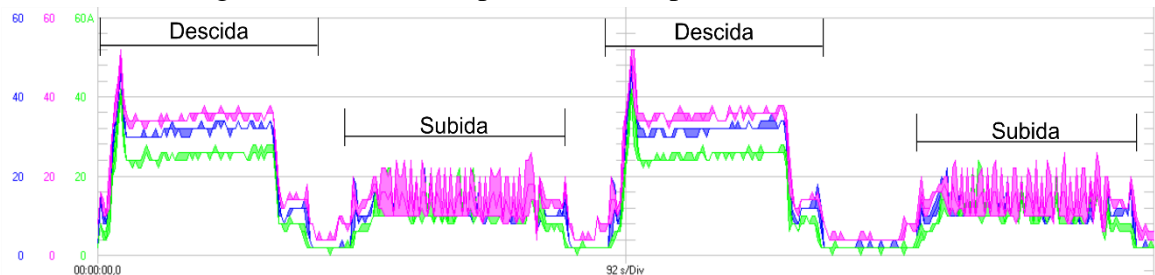
Figura 25 Potência ativa durante a viagem padrão – Elevador A.



Fonte: Autor.

A figura 26 exibe a corrente de pico nas três fases durante o ensaio.

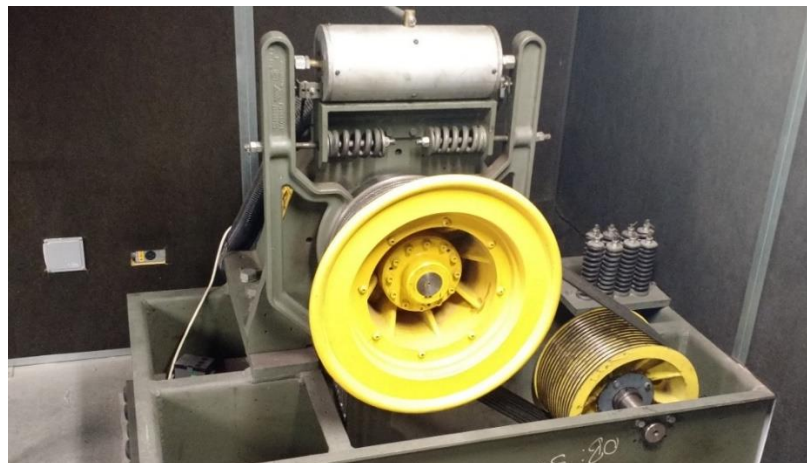
Figura 26 Corrente de pico durante o percurso – Elevador A.



Fonte: Autor.

Na figura 27 a máquina de tração do elevador A, do tipo de indução e não engrenada.

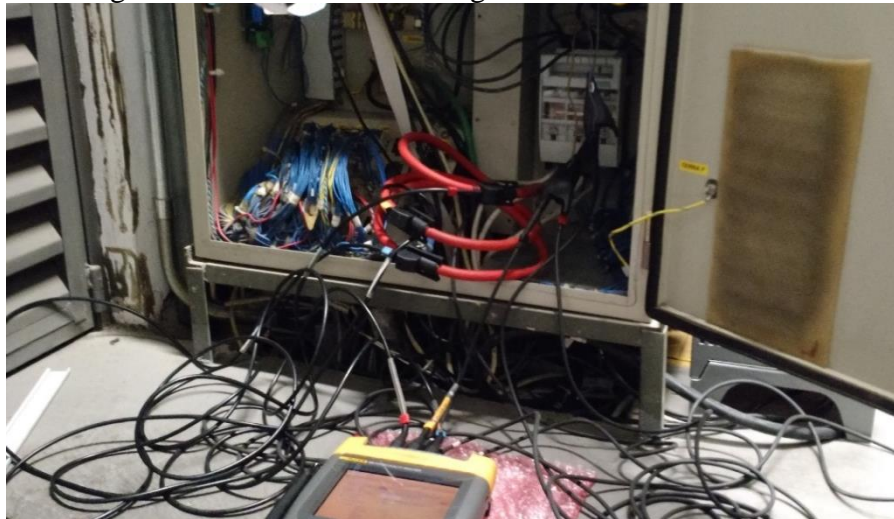
Figura 27. Máquina de Tração de Indução – Elevador A.



Fonte: Autor.

Na figura 28 o analisador de energia instalado no quadro de comando do elevador A.

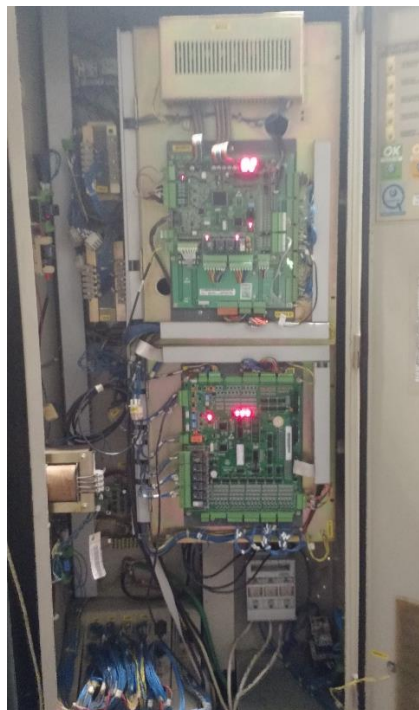
Figura 28. Analisador de Energia Instalado – Elevador A.



Fonte: Autor.

A figura 29 mostra por completo o quadro de comando do elevador A.

Figura 29. Quadro de Comando Elevador A.



Fonte: Autor.

4.2. Elevador B – VVVF Sem Frenagem Regenerativa

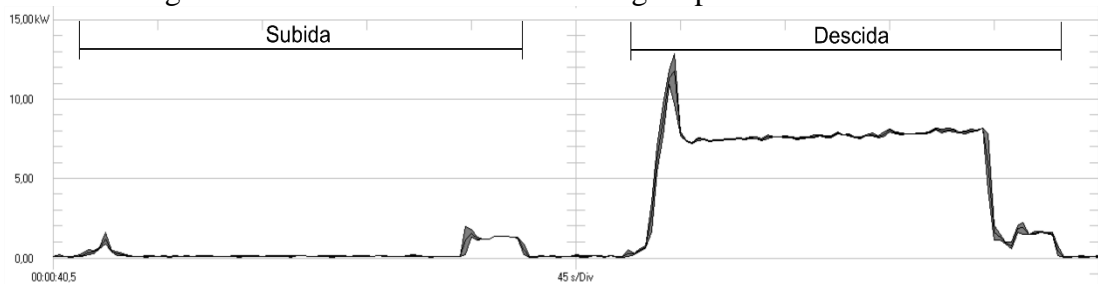
Quadro 6. Dados do Elevador B

Acionamento	ACVVVF
Potência Nominal do Motor	15 kW
Capacidade	1400 kg / 18 passageiros
Velocidade da Cabina	1,75 m/s
Número de Paradas	15
Altura de Viagem	50,16 m
Tração	2:1
Frenagem Regenerativa	NÃO
Categoria de Uso (VDI 4707)	3
Tempo médio de viagem por dia	3 horas
Potência Standby Circuito Principal	141,56 W
Potência Standby Circuito Auxiliar	137,10 W
Potência Total em Standby	278,66 W
Demanda em Standby	0,221 mWh/kgm
Demanda em Viagem	0,400 mWh/kgm
Demanda Total	0,621 mWh/kgm
Classificação para Demanda Standby	D
Classificação para Demanda em Viagem	A
Classe de Eficiência Energética	B

O elevador B é idêntico ao elevador A porém sem a unidade regenerativa externa.

A figura 30 exibe a curva de potência ativa durante o ensaio realizado.

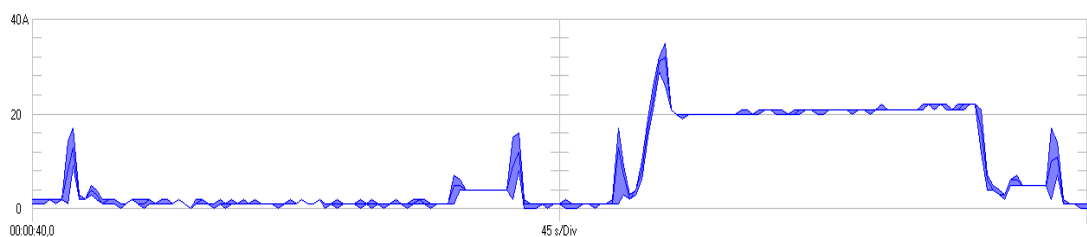
Figura 30. Potência ativa durante a viagem padrão – Elevador B.



Fonte: Autor

Na figura 31 o gráfico da corrente RMS de uma das fases durante a viagem padrão.

Figura 31. Corrente RMS durante viagem padrão – Elevador B.



Fonte: Autor.

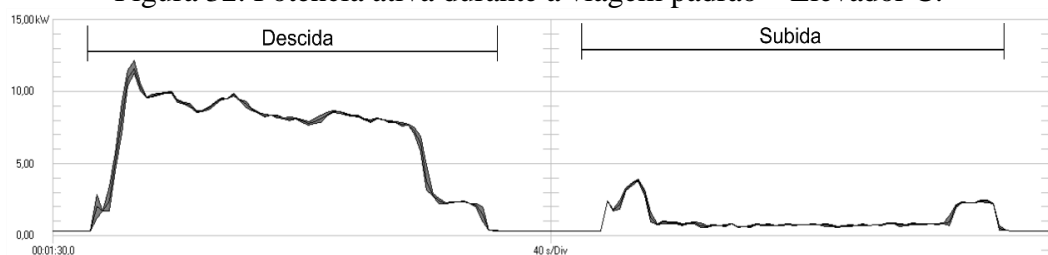
4.3. Elevador C – Controle C.C

Quadro 7. Dados do Elevador C.

Acionamento	Controle C.C
Tipo de Motor	Corrente Contínua
Potência Nominal do Motor	11 kW
Tensão da rede	380 VCA
Capacidade	450 kg / 6 passageiros
Velocidade da Cabina	1 m/s
Número de Paradas	8
Altura de Viagem	30 m
Tração	2:1
Frenagem Regenerativa	NÃO
Categoria de Uso (VDI 4707)	2
Tempo médio de viagem por dia	1,5 horas
Potência Standby Circuito Principal	268,56 W
Potência Standby Circuito Auxiliar	138,27 W
Potência Total em Standby	406,83 W
Demanda em Standby	3,767 mWh/kgm
Demanda em Viagem	2,046 mWh/kgm
Demanda Total	5,813 mWh/kgm
Classificação para Demanda Standby	E
Classificação para Demanda em Viagem	E
Classe de Eficiência Energética	E

A figura 32 mostra o gráfico da potência ativa durante o ensaio realizado.

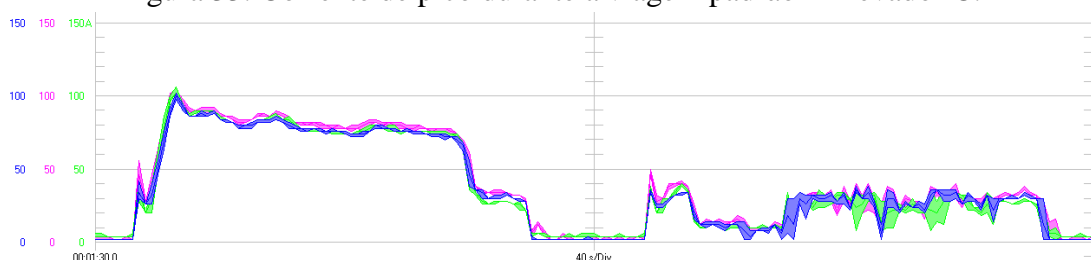
Figura 32. Potência ativa durante a viagem padrão – Elevador C.



Fonte: Autor.

Na figura 33 está o gráfico da corrente de pico do elevador C durante viagem padrão.

Figura 33. Corrente de pico durante a viagem padrão – Elevador C.



Fonte: Autor

A máquina de tração e o quadro de comando do elevador C estão na figura 34.

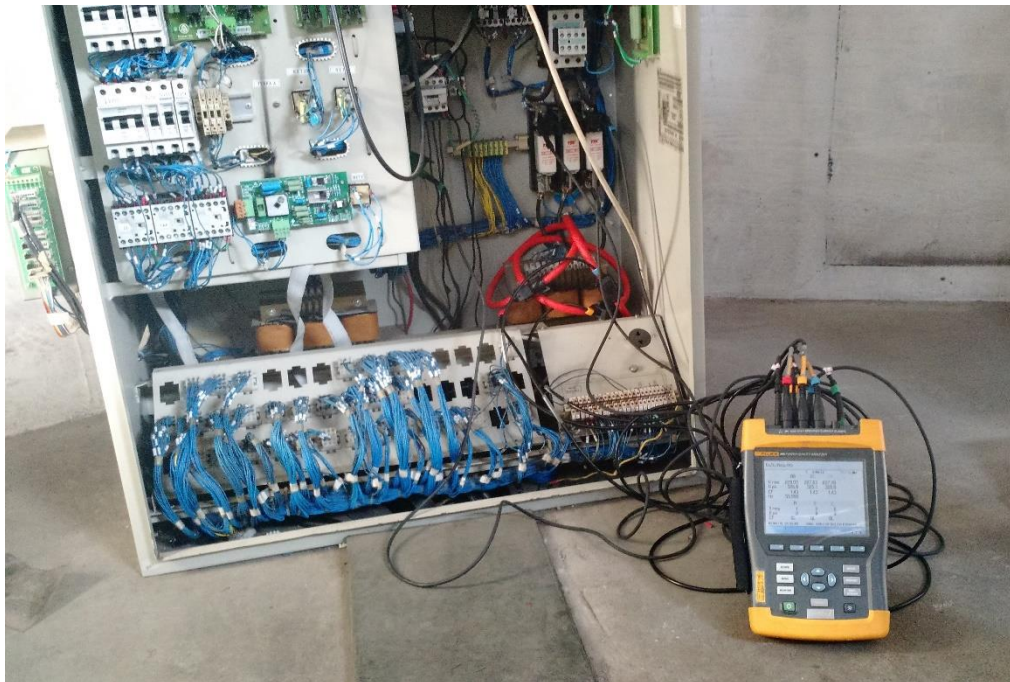
Figura 34. Casa de Máquinas Elevador C.



Fonte: Autor.

Na figura 25 o analisador de energia instalado no elevador C.

Figura 35. Analisador de Energia Instalado – Elevador C.



Fonte: Autor.

A figura 36 exibe uma visão lateral da máquina de tração do elevador C.

Figura 36. Motor do Elevador C.



Fonte: Autoria Própria.

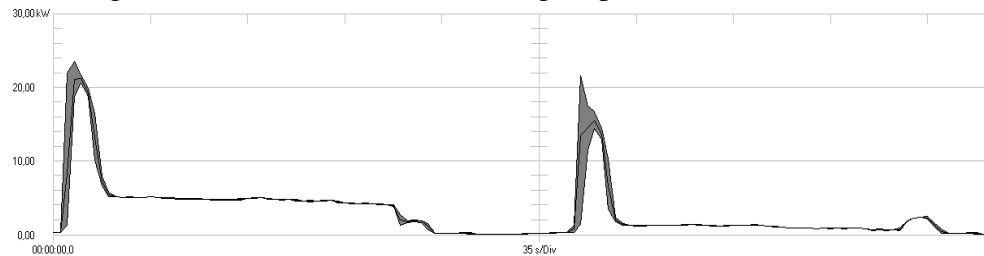
4.4. Elevador D – ACVV

Quadro 8. Dados do Elevador D.

Acionamento	ACVV
Tipo de Motor	Indução
Potência Nominal do Motor	7,5 kW
Tensão da rede	220 VCA
Capacidade	450 kg / 6 passageiros
Velocidade da Cabina	1,25 m/s
Número de Paradas	10
Altura de Viagem	33,15
Tração	1:1
Frenagem Regenerativa	NÃO
Categoria de Uso (VDI 4707)	2
Tempo médio de viagem por dia	1,5 horas
Potência Standby Circuito Principal	81,09 W
Potência Standby Circuito Auxiliar	75,65 W
Potência Total em Standby	156,74 W
Demanda em Standby	1,161 mWh/kgm
Demanda em Viagem	1,441 mWh/kgm
Demanda Total	2,602 mWh/kgm
Classificação para Demanda Standby	C
Classificação para Demanda em Viagem	D
Classe de Eficiência Energética	C

A figura 37 mostra o gráfico de potência ativa durante a viagem padrão do elevador D.

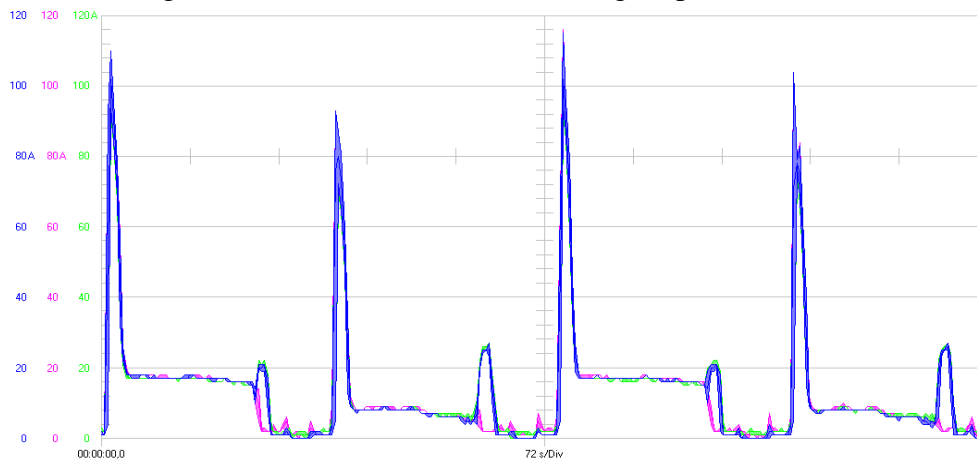
Figura 37. Potência ativa durante viagem padrão – Elevador D.



Fonte: Autor.

Na figura 38 o gráfico de corrente RMS durante ensaio com o elevador D, observa-se o efeito da frenagem dinâmica durante a redução, as fases representadas pelas cores verde e azul são utilizadas na frenagem.

Figura 38. Corrente RMS durante viagem padrão – Elevador D.



Fonte: Autor.

Na figura 39 a máquina de tração e quadro de comando do elevador D.

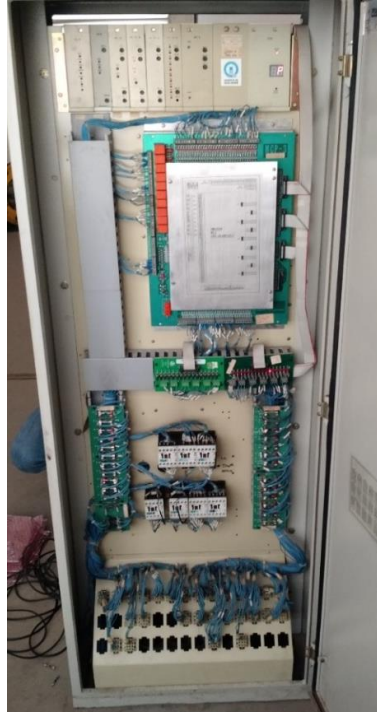
Figura 39. Casa de Máquinas Elevador D.



Fonte: Autor.

A figura 40 mostra um dos lados do quadro de comando do elevador D.

Figura 40. Quadro de Comando Elevador D, Lado 1.



Fonte: Autor.

Na figura 41 o lado do quadro do elevador D onde está o módulo de potência.

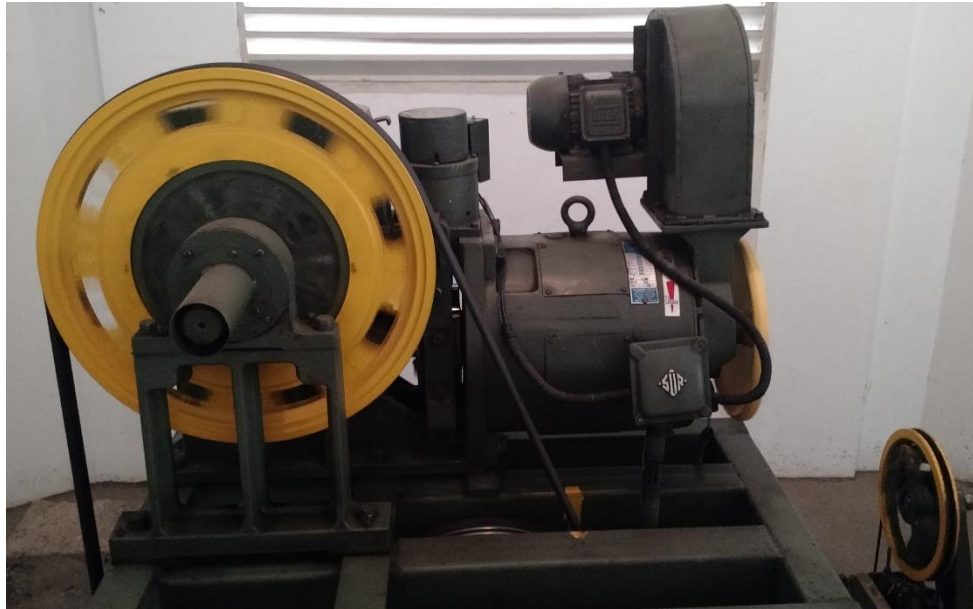
Figura 41. Quadro de Comando Elevador D, Lado 2.



Fonte: Autor.

A figura 42 é uma foto da máquina de tração do elevador D, do tipo com engrenagem.

Figura 42. Motor e Máquina de Tração Elevador D.



Fonte: Autor.

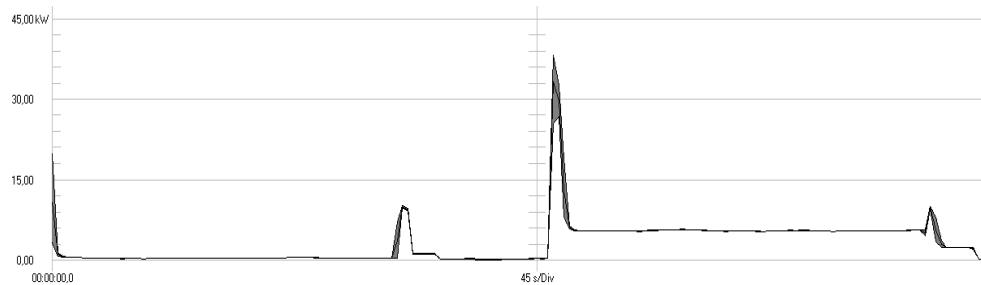
4.5. Elevador E – AC2

Quadro 9. Dados do Elevador E.

Acionamento	AC2
Tipo de Motor	Indução
Potência Nominal do Motor	7,5 kW
Tensão da rede	220 VCA
Capacidade	600 kg / 8 passageiros
Velocidade da Cabina	1 m/s
Número de Paradas	10
Altura de Viagem	33,2 m
Tração	1:1
Frenagem Regenerativa	NÃO
Categoria de Uso (VDI 4707)	3
Tempo médio de viagem por dia	3 horas
Potência Standby Circuito Principal	107,65 W
Potência Standby Circuito Auxiliar	37,85 W
Potência Total em Standby	145,350 W
Demanda em Standby	0,674 mWh/kgm
Demanda em Viagem	2,103 mWh/kgm
Demanda Total	2,777 mWh/kgm
Classificação para Demanda Standby	C
Classificação para Demanda em Viagem	E
Classe de Eficiência Energética	D

A figura 43 é um gráfico da potência ativa medida durante o ensaio com o elevador E.

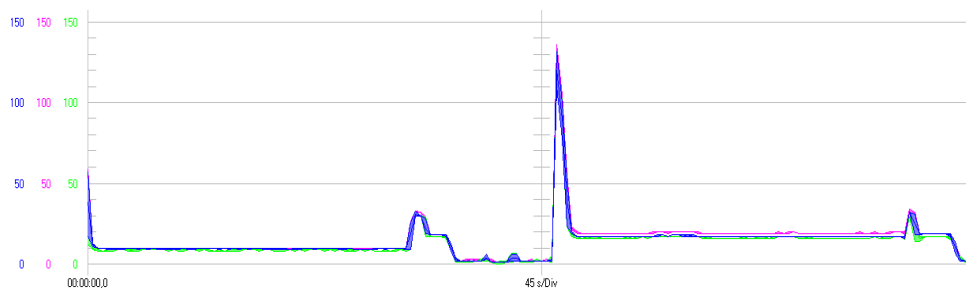
Figura 43. Potência ativa durante viagem padrão – Elevador E.



Fonte: Autor.

O gráfico da corrente RMS durante o ensaio do elevador E pode ser visto na figura 44.

Figura 44. Corrente RMS durante viagem padrão – Elevador E.



Fonte: Autor.

Na figura 45 a casa de máquinas do elevador E.

Figura 45. Casa de Máquinas - Elevador E.



Fonte: Autor.

A figura 46 é da vista frontal do quadro de comando do elevador E.

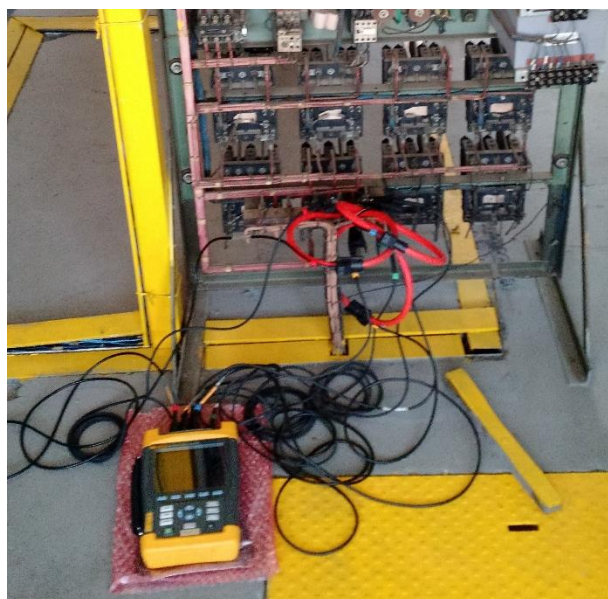
Figura 46. Quadro de Comando - Elevador E.



Fonte: Autor.

Na figura 47 o analisador de energia já instalado no elevador E.

Figura 47. Analisador de Energia - Elevador E.



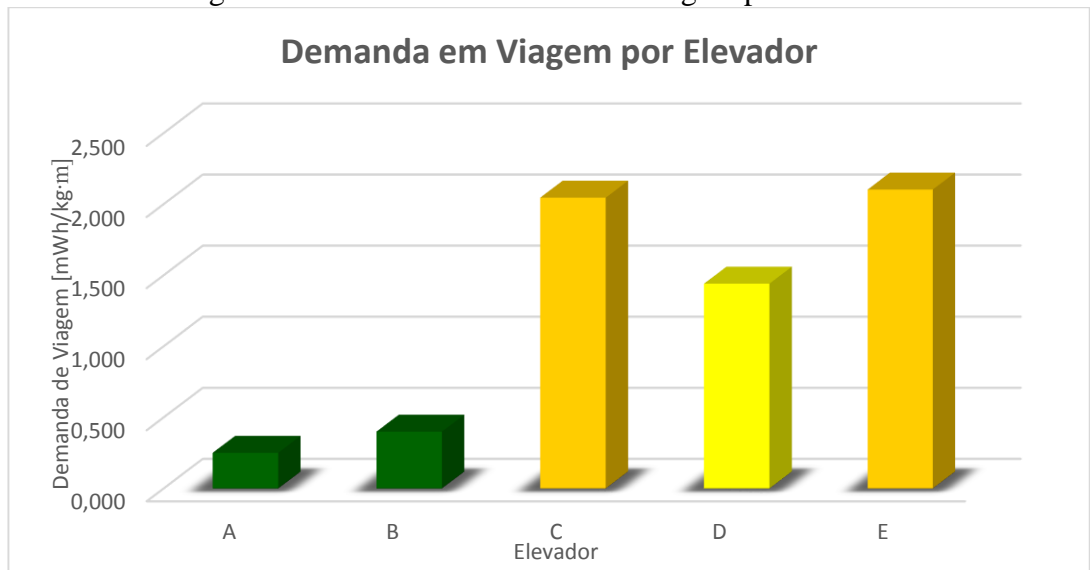
Fonte: Autor.

5. ANÁLISE DOS DADOS

5.1. Comparativo de consumo

Na figura 48 é feito um comparativo entre a demanda de viagem de cada elevador estudado. As cores das barras representam a nota obtida pelo elevador neste item, de acordo com a VDI 4707.

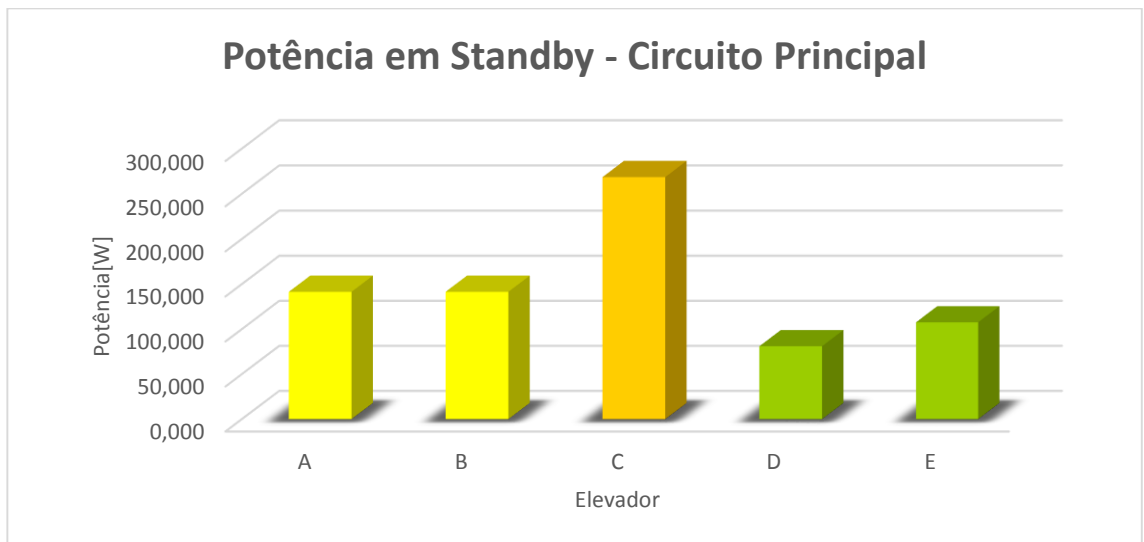
Figura 48. Gráfico de Demanda de Viagem por Elevador.



Fonte: Autor.

De forma semelhante, a figura 49 é um comparativo da potência em *standby* do circuito principal de cada elevador.

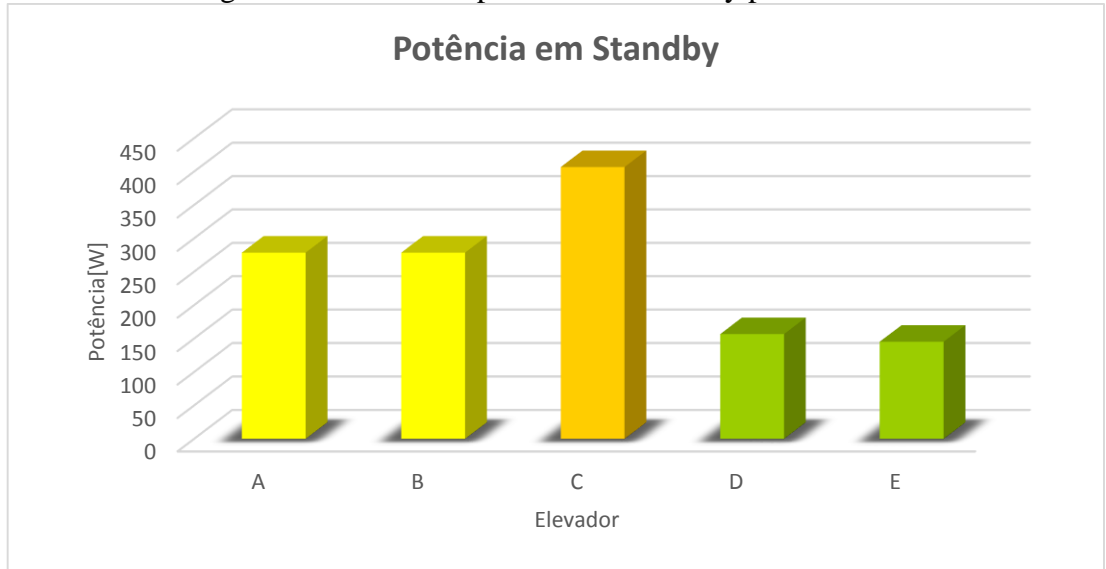
Figura 49. Gráfico Potência em Standby do circuito principal.



Fonte: Autor.

Na figura 50 é feito um comparativo da potência total em *standby*.

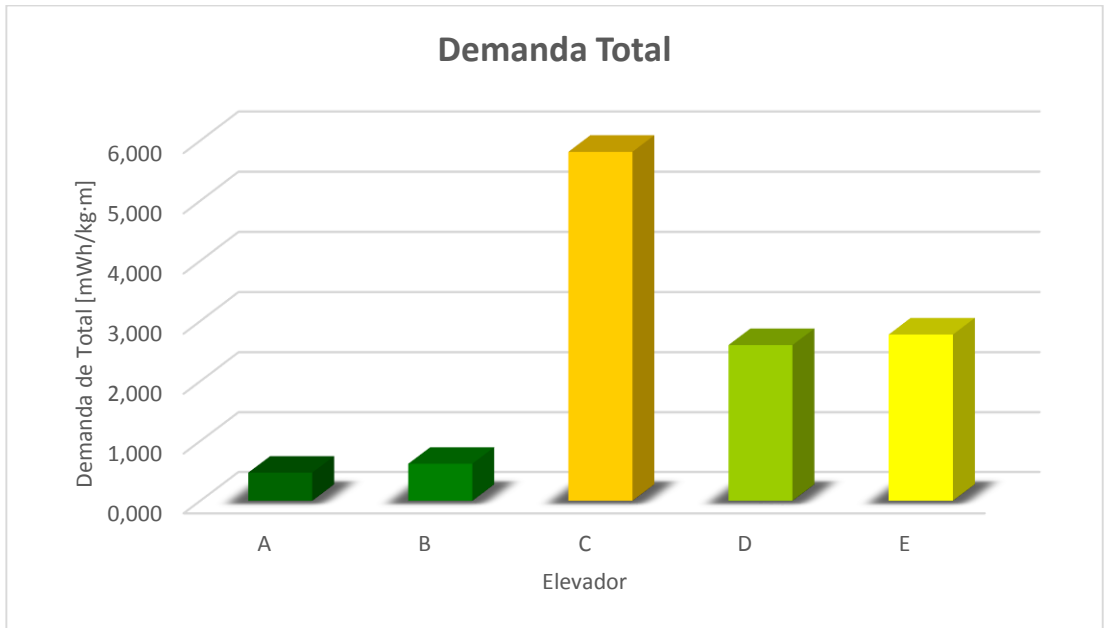
Figura 50. Gráfico de potência em standby por elevador.



Fonte: Autor.

A figura 51 exibe o comparativo da demanda total dos elevadores analisados, conforme VDI 4707. As cores estão associadas ao conceito final obtido.

Figura 51 Gráfico de demanda total por elevador



Fonte: Autor.

Conforme figura 47, os elevadores com acionamento VVVF, mesmo sem a unidade regenerativa, apresentaram desempenho muito superior aos demais durante a viagem padrão, recebendo conceito A neste quesito de acordo com a VDI 4707. O quadro de comando com acionamento ACVV ficou em uma posição intermediária, o que já representou um consumo 5,74 vezes superior ao do quadro VVVF com unidade regenerativa, recebendo conceito D conforme VDI 4707. O pior desempenho durante o deslocamento do elevador foi dos quadros de comando com acionamento Controle C.C e AC2, quase empatados, com consumo pouco mais de 8 vezes superior ao quadro VVVF com unidade regenerativa.

O quadro de comando que apresentou pior consumo de energia em *standby* foi o Controle C.C com 268,56 W, isto somado ao seu mau desempenho em viagem fez dele o quadro menos eficiente entre os modelos estudados, recebendo conceito final 'E'. O quadro de comando ACVV é o mais econômico em *standby* com 81,09 W, 70% inferior ao consumo do Controle C.C. No quesito consumo de energia no circuito auxiliar, que se refere principalmente à iluminação de cabina, os elevadores A e B foram prejudicados, estes são os únicos do estudo com iluminação a LED, mas suas cabinas são para 18 pessoas, enquanto os demais são de 6 ou 8 pessoas, isso fez com que ficassem em uma posição intermediária e não entre os mais eficientes. A VDI 4707 não leva em consideração a capacidade de carga da cabina ao avaliar o consumo em *standby*.

Com auxílio dos dados levantados, o consumo diário dos elevadores pode ser estimado da seguinte maneira:

$$E/dia = D_{total} \cdot Cap \cdot t_{movimento} \cdot v \cdot 3,6$$

Onde:

E é energia, dada em Wh.

Supondo que a eficiência do sistema se mantém a mesma quando aplicado em elevadores de capacidades distintas, e levando em consideração as diferenças no fluxo de passageiros, pode-se estimar também qual seria a economia de energia obtida com uma modernização.

Quadro 10. Comparativo de consumo entre os modelos estudados.

Elevador	Consumo Diário	Consumo caso alterado para VVVF(Sem Regen)	Economia Anual	Economia Anual (kWh = R\$ 0,715)
A	18283 Wh	-	-	-
B	26196 Wh	-	-	-
C	14124 Wh	10126 Wh	1459,27 kWh	R\$ 1043,38
D	7902 Wh	4742 Wh	1153,4 kWh	R\$ 824,68
E	12597 Wh	4870 Wh	2820,36 kWh	R\$ 2016,55

5.2. Frenagem Regenerativa

A frenagem regenerativa trouxe uma economia considerável nos quadros analisados, reduzindo o consumo em uma viagem padrão de 77 para 47Wh, ou 38,96%. Pode estimar que o consumo diário do equipamento reduz aproximadamente 30,2%, porém este valor pode oscilar entre 20 e 35% conforme as características de uso do elevador.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão apresentou uma revisão conceitual e teórica das principais tecnologias envolvidas na indústria de elevadores. Foram abordados os métodos e produtos atuais assim como os que já não são produzidos, mas ainda são utilizados em larga escala. Um estudo de caso foi realizado, para se obter medições de forma padronizada a respeito do consumo de energia de cada equipamento. O objetivo do estudo foi de avaliar a eficiência energética dos elevadores, se antecipar a possíveis regras impostas por agências reguladoras e utilizar estas informações na tomada de decisões bem informadas.

Em relação aos resultados obtidos, ficou clara a relevante diferença no consumo energético entre o modelo atual, acionado por inversores de frequência, e os demais modelos analisados, na situação em que o elevador se encontra em movimento. Pode-se concluir, através das curvas de corrente e potência coletadas, que é durante a aceleração do elevador que ocorre a maior discrepância entre o consumo dos elevadores atuais em relação aos antigos. Quando analisamos o consumo dos quadros de comando em *standby*, os elevadores com acionamento ACVV e AC2 mostraram melhor resultado, enquanto os quadros mais modernos ficaram em posição intermediária. Desta forma podemos afirmar que os elevadores antigos que se enquadram nas categorias de alto fluxo de passageiros, são os que terão maior retorno ao serem submetidos a uma modernização. Para melhorar o consumo de elevadores com baixo fluxo de passageiros, o mais indicado é procurar alternativas para aumentar a eficiência da iluminação na cabina. A unidade regenerativa teve sua efetividade comprovada, tanto através dos gráficos de potência ativa quando no consumo medido, levando a uma redução de aproximadamente 30% no consumo diário do elevador. As diferenças no tamanho e na qualidade da iluminação das cabinas estudadas dificultaram uma análise definitiva a respeito do consumo do circuito auxiliar, podendo ser assunto interessante para um trabalho futuro.

REFERÊNCIAS

FUENTES, R. (2005). *Apostila de Automação Industrial*. Acesso em 4 de Maio de 2015, disponível em http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/CA05.pdf

Hughes, A. (2006). *Electric Motors and Drives*.

Al-Sharif, L., R. Peters, and R. Smith. 2004. "Elevator Energy Simulation Model." *Elevator World*, November, 108–11.

Enermodal Engineering Limited. 2004. *Market Assessment for Energy Efficient Elevators and Escalators, Final Report*.

Borle, Lawrence Joseph. Zero Average Current Error Control Methods for Bidirectional AC-DC Converters. Dissertação (Doutorado em engenharia), Curtin University of Technology, Australia. 1999.

Como Trabalhar a Curva V/Hz no Inversor de Frequência. Disponível em <http://www.mecatronicaatual.com.br/cache/MA29_Inversores_01_files_image_thumb_medium600_300.jpg>. Acesso em 24 de Maio de 2015.

Rodríguez, J., Dixon, J. et al. PWM Regenerative Rectifiers: State of the art. *Transactions on industrial Electronics*, Vol. 52, NO. 1, 22p., Fev, 2005.

Ramshaw, Raymond S. *Power electronics: thyristor controlled power for electric motors*. Springer Science & Business Media, 2012.

Patrão, Carlos, et al. "Energy efficient elevators and escalators." *ECEEE*. 2009.

Chapman, Stephen. *Electric machinery fundamentals*. Tata McGraw-Hill Education, 2005.