



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL SEITI VENDRAME KUDO  
GABRIEL DOS REIS MORALES  
FELIPE MICALI

TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE  
FRENAGEM DE TRENS

TRABALHO DE FORMATURA

São Paulo  
2017

**FELIPE MICALI  
GABRIEL DOS REIS MORALES  
GABRIEL SEITI VENDRAME KUDO**

**TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE  
FRENOLOGIA DE TRENS**

Trabalho de Formatura do Curso de  
Engenharia Civil apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo

Orientador: Prof. Dr. Telmo G. Porto

São Paulo  
2017

#### Catálogo-na-publicação

MICALI, FELIPE

TECNOLOGIAS DE RECUPERACAO DE ENERGIA A PARTIR DE  
FRENAGEM DE TRENS / F. MICALI, G. KUDO, G. MORALES -- São Paulo,  
2017.

141 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.TECNOLOGIAS DE RECUPERACAO DE ENERGIA A PARTIR DE  
FRENAGEM DE TRENS I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia de Transportes II.t. III.KUDO, GABRIEL  
IV.MORALES, GABRIEL



# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVO .....	12
3. METODOLOGIA .....	13
4. HISTÓRICO E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS .....	14
4.1. STIB.....	14
4.1.1. Contexto.....	14
4.1.2. Experiência passada.....	14
4.1.3. Topologia das linhas e headway .....	15
4.1.4. Veículos .....	18
4.1.5. Rede Elétrica.....	19
4.1.6. Tomada de decisões.....	20
4.1.7. Resultados.....	33
4.2. moBiel - Bielefeld.....	34
4.2.1. Contexto.....	34
4.2.2. Experiência passada.....	34
4.2.3. Topologia das linhas e headway .....	34
4.2.4. Veículos .....	35
4.2.5. Rede Elétrica.....	36
4.2.6. Tomando decisões .....	37
4.2.7. Resultados.....	45
4.3. RET - Rotterdam.....	49
4.3.1. Contexto.....	49
4.3.2. Experiência Passada .....	49
4.3.3. Topologia das linhas e headways .....	50
4.3.4. Veículos .....	51
4.3.5. Rede elétrica .....	52
4.3.6. Tomando decisões .....	53
4.3.7. Resultados.....	58
4.4. TfGM.....	58
4.4.1. Contexto.....	59
4.4.2. Experiência passada.....	59
4.4.3. Topologia das linhas e headways .....	59
4.4.4. Veículos .....	60

4.4.5.	Rede elétrica .....	60
4.4.6.	Tomando decisões .....	60
4.4.7.	Resultados.....	61
4.5.	Empresas e produtos.....	62
4.5.1.	Alstom.....	62
4.5.2.	INGETEA.....	63
4.5.3.	Movares .....	64
4.5.4.	Adetel .....	66
5.	TECNOLOGIAS DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA FRENAGEM DE TRENS.....	67
5.1.	Conceito de recuperação de energia da frenagem.....	67
5.2.	Tipos de sistemas.....	69
5.2.1.	Comparação entre os sistemas.....	73
5.3.	Tipos de tecnologias já existentes.....	73
5.3.1.	Baterias .....	73
5.3.2.	Ultracapacitores .....	74
5.3.3.	Flywheels .....	77
5.3.4.	Subestações Reversíveis.....	81
6.	DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA MAIS PROMISSORA .....	85
6.1.	Oportunidades.....	85
6.1.1.	Linhas sem catenárias.....	86
6.1.2.	Proprietário da rede elétrica.....	87
6.1.3.	Características da rede elétrica.....	88
6.1.4.	Topografia do terreno e tempo de ciclo dos veículos .....	89
6.1.5.	Tipo e idade dos veículos.....	91
6.1.6.	Consumo de energia elétrica do sistema de recuperação.....	92
6.1.7.	Sistema de armazenamento compartilhado.....	93
7.	EMPRESAS MAIS PROMISSORAS E SEUS PRODUTOS.....	97
7.1.	Alstom e Ingeteam: Panorama Geral .....	97
7.1.1.	Alstom HESOP: Harmonic & Energy Saving Optimiser .....	98
7.1.2.	Ingeteam INGEER: INGETEA Braking Energy Recovery.....	102
8.	DETALHAMENTO DAS TÉCNOLOGIAS.....	104
8.1.	Alstom HESOP: Harmonic & Energy Saving Optimiser .....	104
8.1.1.	HESOP: Motivação .....	105
8.1.2.	HESOP: Objetivos e Desafios .....	106

8.1.3.	HESOP: Descrição Geral .....	106
8.1.5.	HESOP: Evolução do Produto.....	109
8.1.6.	HESOP: Mecanismo de funcionamento .....	109
8.1.7.	HESOP: Cases .....	111
8.1.8.	HESOP: Contratos em andamento.....	113
8.2.	Ingeteam INGEBER: INGETEAM Braking Energy Recovery.....	114
8.2.1.	INGEBER: Motivação .....	114
8.2.2.	INGEBER: Objetivos e Desafios .....	114
8.2.4.	INGEBER: Benefícios.....	118
8.2.5.	INGEBER: Evolução do Produto.....	119
8.2.6.	INGEBER: Alcance Global.....	119
8.2.7.	INGEBER: Fases de Implementação.....	121
8.2.8.	INGEBER: Cases .....	125
8.2.9.	INGEBER: Oportunidades Futuras.....	134
8.2.10.	INGEBER: Conclusão.....	136
9.	CONCLUSÃO .....	139
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	140

## Índice de Figuras

Figura 1 - Mapa da rede de metro de Bruxelas .....	15
Figura 2 - Esquema da rede de metro de Bruxelas .....	16
Figura 3 - Perfil de uma linha de metro de Bruxelas.....	17
Figura 4 - Esquema de funcionamento da rede elétrica do metro de Bruxelas .....	20
Figura 5 - Medições experimentais do consumo de energia da rede no caso da STIB 24	
Figura 6 - Comparação entre a medição real e os resultados da simulação, VUB .....	25
Figura 7 - Evolução das economias anuais de energia com o aumento do número de inversores, VUB.....	27
Figura 8 - Benefícios da economia de energia para um ESS (Energy Storage System) a bordo de um bonde na linha 23 .....	29
Figura 9 - Adaptação das ligações dos cabos de alta tensão para o transformador, STIB.....	33
Figura 10 - Planta da rede de bondes da moBiel composta por 4 linhas.....	35
Figura 11 - Vista da configuração da rede elétrica da rede de bondes da moBiel, moBiel.....	36
Figura 12 - Vista do sistema de flywheel PILLER .....	40
Figura 13 - Vista dos picos de potência da subestação de Oetkerhalle, medidos em 07/03/2013.....	43
Figura 14 - Resultados de fornecimento e realimentação de energia ao longo do dia; Medidos em 17/04/2013.....	44
Figura 15 - Resultados de fornecimento e realimentação de energia ao longo da semana.....	45
Figura 16 - Visão geral dos resultados da realimentação de energia de todas subestações com sistema de recuperação de energia em correlação com a temperatura média .....	46
Figura 17 - Redução dos picos de energia, sistema de armazenamento de energia ligado na semana 14 do calendário (esquerda), e desligado na semana 15 do calendário (direita).....	48
Figura 18 - Planta da rede de metro RET composta por 5 linhas .....	51
Figura 19 - Visão da simulação do "timetable" da linha C de Benelux, Movares .....	55
Figura 20 - Simulação de economia de energia semanal da linha de Benelux, Movares .....	55
Figura 21 - Visão da simulação do "timetable" da linha D de Erasmus, Movares .....	56
Figura 22 - Simulação de economia de energia semanal da linha de Erasmus, Movares .....	57
Figura 23 - Bonde elétrico de Moscou .....	68
Figura 24 - Terceiro Trilho do metrô.....	68
Figura 25 - Foto do Catenary Free 1 (Midland, Texas) .....	71
Figura 26 - Foto do Catenary Free 2 (Bordeaux, France) .....	72
Figura 27 - Foto com os Ultracapacitores 1 .....	75
Figura 28 - Foto com os Ultracapacitores 2 .....	75
Figura 29 - Ilustração dos Ultracapacitores.....	76
Figura 30 - Foto do Flywheel 1.....	79
Figura 31 - Foto do banco de Flywheels operando em série .....	80



Figura 32 - Foto do Flywheel 2.....	80
Figura 33 – Esquema de funcionamento do reversível: Fluxo de energia.....	82
Figura 34 - Ilustração do funcionamento do reversível instalado .....	82
Figura 35 – Esquema da Subestação Reversível HESOP .....	99
Figura 36 – HESOP: Fluxo energético no sistema .....	100
Figura 37 – Fluxo energético dos trens para a rede elétrica.....	101
Figura 38 – Fluxo energético em tempo real entre trens .....	102
Figura 39 – INGEBER: Fluxo energético entre trens.....	103
Figura 40 – Componentes do sistema INGEBER .....	104
Figura 41 – Distribuição percentual das receitas da Alstom mundialmente .....	105
Figura 42 – Esquema comparativo entre uma subestação clássica e uma do tipo HESOP.....	107
Figura 43 – Resistor típico de trens usado nas frenagens. Alta emissão de calor e adição ao peso dos veículos .....	108
Figura 44 – Aplicação da energia recuperada dentro das estações: uso em sinalizações iluminação, escadas-rolantes, dentre outros.....	108
Figura 45 – Ilustração da distribuição típica da energia recuperada dentro de uma linha convencional .....	110
Figura 46 – Esquema comparativo entre uma subestação clássica e uma do tipo HESOP.....	110
Figura 47 – Trem modelo Bombardier da Alstom na linha Victoria, Londres.....	111
Figura 48 – Balanço energético em um sistema .....	115
Figura 49 – Fluxograma das fases de implementação do sistema INGEBER .....	122
Figura 50 – Software de simulações para o dimensionamento do sistema.....	123
Figura 51 – Sistema INGEBER e seus controladores (locais ou remotos).....	124
Figura 52 – Posicionamento dos transformadores da subestação.....	124
Figura 53 – Mapa do Metrô de Bilbao .....	127
Figura 54 – Composição de consumo, metrô de Bilbao .....	128
Figura 55 – Mapa do sistema ferroviário de Fuengirola.....	129
Figura 56 – Trens do sistema ferroviário de Fuengirola.....	130
Figura 57 – Composição de consumo, sistema ferroviário de Fuengirola .....	131
Figura 58 – Mapa do metrô de Bruxelas .....	132
Figura 59 – Composição do consumo energético do metrô de Bruxelas .....	133
Figura 60 – Sistema INGEBER instalado no metrô de Bruxelas .....	134

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tabela de Headways das linhas de metro de Bruxelas em diferentes períodos de funcionamento .....	17
Tabela 2 - Características dos trens analisados no caso da STIB .....	18
Tabela 3 - Características da rede elétrica do metro de Bruxelas.....	20
Tabela 4 - Critérios selecionados para a avaliação da análise multi-critérios da STIB.....	21
Tabela 5 - Resultados da simulação com volume de tráfego baixo .....	26
Tabela 6 - Resultados da simulação com volume de tráfego médio.....	26
Tabela 7 - Resultados da simulação com volume de tráfego alto .....	26
Tabela 8 - Economia de energia para um T3000 na linha .....	28
Tabela 9 - Economia anual de energia devido à inclusão de um ESS a bordo de um bonde.....	29
Tabela 10 - Dados técnicos do inversor da INGETEAM .....	31
Tabela 11 - Extrapolação dos resultados da implantação de sistemas de recuperação de energia de frenagem das linhas 2 e 6, STIB .....	34
Tabela 12 - Visão geral dos dados dos bondes da moBiel, moBiel .....	36
Tabela 13 - Visão geral dos dados da rede da moBiel, moBiel.....	37
Tabela 14 - Dados técnicos do sistema de flywheel PILLER .....	41
Tabela 15 - Dados técnicos do inversor da INGETEAM .....	43
Tabela 16 - Visão geral dos resultados baseado em medições reais e simulações.....	47
Tabela 17 - Visão geral de custos e economia de energia .....	47
Tabela 18 - Resultados das medições de ruídos do sistema de supercapacitores, RET .....	50
Tabela 19 - Número médio de trens na linha D do metro RET, RET .....	51
Tabela 20 - Visão geral dos veículos da linha D da RET .....	52
Tabela 21 - Características da rede elétrica do metrô, RET.....	53
Tabela 22 - Business case para o sistema de recuperação de energia de frenagem, RET .....	54
Tabela 23 - Dados técnicos dos inversores utilizados.....	58
Tabela 24 - Resultados da simulação dos sistemas de armazenamento de energia baseado em supercapacitores .....	61
Tabela 25 - Comparação de aplicações das tecnologias.....	73
Tabela 26 - Quadro de Comparação das tecnologias .....	84
Tabela 27 – Especificações da linha e da subestação da linha Victoria, Londres .....	112
Tabela 28 – Características do Sistema INGEBER em Bilbao .....	126
Tabela 29 – Características dos sistemas INGEBER instalados em Fuengirola .....	130
Tabela 30 – Características dos sistemas INGEBER instalados em Bruxelas.....	133

## 1. INTRODUÇÃO

Com o processo de urbanização, presente em diversos locais do mundo, surgiram diversos desafios quanto à questão da Mobilidade Urbana, principalmente em regiões que apresentam maior densidade demográfica devido à concentração de diversas pessoas e de atividades. A Região Metropolitana de São Paulo possui uma população acima de 20 milhões de habitantes (IBGE, 2010) e apresenta diversas dificuldades com a questão de mobilidade, que possui grande impacto nas atividades sociais e econômicas realizadas na região e, conseqüentemente, em seu desenvolvimento.

Diante da atual situação do transporte urbano, em que grande parte da população é prejudicada pelos frequentes congestionamentos e elevados períodos de viagens, o transporte sobre trilhos se apresenta como uma solução promissora em muitos dos casos de adversidades existentes.

Segundo o relatório administrativo da CPTM, a Companhia transportou 795,4 milhões de passageiros em 2013, representando uma média de 2,66 milhões de passageiros por dia útil. À luz disso e das crescentes taxas de crescimento e urbanização, é possível observar o grande impacto que o transporte sobre trilhos possui na mobilidade da região.

Porém, o transporte sobre trilhos apresenta um elevado custo em sua implementação e operação. Estes custos são repassados para seus usuários com tarifas caras, o que torna este meio de transporte menos democrático e menos acessível para a população.

Nesse contexto, visando reduzir estes custos e tarifas, são procuradas diferentes alternativas para a otimização da operação dos trens. Dentre essas alternativas, é possível citar a implementação de novas tecnologias que promovem um melhor aproveitamento produtivo e energético.

Uma vez que a locomotiva dos trens é alimentada por energia elétrica, este fator representa uma boa parte nos custos de sua operação. Portanto, uma possível solução para esta questão se torna importante: A regeneração de energia elétrica a partir da frenagem dos trens.

O presente documento constitui uma seleção de algumas tecnologias de regeneração de energia de frenagem já existentes no mundo, assim como o apontamento das principais diferenças entre cada uma delas e suas experiências, levantando aquelas mais promissoras de acordo com os desempenhos já obtidos no cenário mundial.

Considerando que não existe uma solução ótima e genérica, cada caso de aplicação deve ser analisado particularmente pois depende de inúmeros fatores e modelos de análise de decisão, que culminam no uso de um ou de outro tipo de tecnologia. Em vista disso, com o intuito de promover uma melhoria nos atuais sistemas ferroviários, um melhor entendimento dessas tecnologias, assim como a indicação das mais promissoras, se torna imprescindível.

## 2. OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo elaborar um Estado da Arte de algumas tecnologias de recuperação de energia da frenagem de trens já existentes, levantando as principais características operacionais e técnicas de cada uma delas, a fim de se obter um comparativo entre essas tecnologias.

Através da compilação de diversos relatórios e estudos, assim como de experiências de implementação em diferentes sistemas no passado, foram selecionados diversos temas e fatores a serem evidenciados em cada tecnologia. Portanto, serão abordados aspectos tanto da fase de implementação, quanto da fase de operação nos sistemas.

Devido ao fato de que cada tecnologia opera em um sistema ferroviário característico, com diferentes condições de uso e operação, além de fatores de produção que apresentam diferenças entre si, será necessário considerar alguns fatores técnicos na análise. A avaliação das tecnologias é influenciada desde as características da rede elétrica utilizada até diversas características da trajetória e fluxo que os trens desenvolvem.

Após obter um primeiro levantamento das principais tecnologias e suas características, será elaborado a seleção da tecnologia de regeneração energética a partir da frenagem de trens mais promissora frente aos inúmeros aspectos determinados e aos seus estudos detalhados no que diz respeito ao estágio atual de desenvolvimento e aplicação, bem como seus posicionamentos e alcance no mercado global.

Por fim, após selecionada a tecnologia mais promissora, será dado um melhor direcionamento ao estudo através da seleção das empresas e das soluções com os maiores potenciais frente ao mercado e os melhores indicadores de eficiência e performance obtidos até o momento.

E, finalmente, será realizada uma análise detalhada dessas empresas e suas respectivas tecnologias, de modo a evidenciar suas importâncias frente às necessidades globais da economia energética e de outros recursos envolvidos em todo o processo de aquisição, implementação e manutenção dos sistemas.

### 3. METODOLOGIA

Neste trabalho será elaborado um Estado da Arte através do levantamento das principais empresas e tecnologias do mercado metroferroviário que já obtiveram experiências com o reaproveitamento da energia elétrica a partir da frenagem dos trens, apontando as características mais relevantes em sua análise.

A primeira parte desse artigo trata da descrição de diversas tecnologias existentes, além de detalhar os resultados de campo de onde foram inicialmente implementadas. Nesta etapa, é dado um enfoque nos dados fornecidos pela INGETEAM, que é um time de grandes empresas do setor pioneiros a tratar deste tema na Europa, com diversas aplicações documentadas.

A segunda parte entra mais a fundo na tecnologia de subestações reversíveis, adotada como a tecnologia mais promissora, conforme justificado no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, será dado um melhor direcionamento ao estudo através da seleção das empresas e suas soluções com maiores potenciais frente ao mercado, além dos melhores indicadores de eficiência e performance obtidos até o momento.

Nesta segunda etapa, foram mapeadas as duas empresas que atuam em nível global e vendem soluções de subestações reversíveis, com possíveis integrações com outros subsistemas de regeneração ou armazenamento energético. E uma análise detalhada dessas empresas e suas tecnologias será realizada com base em dados do mercado e relatórios gerenciais e comerciais divulgados pelas mesmas.

## **4. HISTÓRICO E EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS**

Na Europa, existem renomadas empresas de transporte pioneiras no assunto. Iremos tratar com detalhamento das seguintes notáveis empresas:

### **4.1. STIB**

#### **4.1.1. Contexto**

A STIB é a maior empresa de transporte público urbano belga e serve os 19 municípios da região de Bruxelas, capital, além de 11 outras comunas periféricas, totalizando mais de 1.100.000 habitantes. A rede engloba 4 linhas de metrô, 19 trilhos de trens elétricos, 50 linhas de ônibus operando durante o dia e mais 11 linhas de ônibus no período noturno. Diante de um rápido crescimento no número de passageiros ao longo dos últimos 10 anos, o Governo de Bruxelas decidiu investir maciçamente na rede de transportes públicos através da otimização da rede de metro com novos trens e maiores frequências de viagens além de melhorias nas redes de ônibus e trens elétricos (veículos novos, melhores frequências, novas linhas). Isso resultou em um aumento de 50% da capacidade de transporte oferecida para a sua população.

#### **4.1.2. Experiência passada**

Essas tecnologias têm sido estudadas na STIB desde 2004. Seu programa - investigação prospectiva para Bruxelas, organizado pela Região de Bruxelas Capital, consistia em um projeto de investigação que foi realizado entre 2007 e 2010 e incidiu sobre a implementação de tecnologias de supercapacitores, tanto para o metro quanto para os trens elétricos. Este projeto, juntamente com a experiência da ULB (Université Libre de Bruxelles) e a VUB (Vrije Universiteit Brussel), permitiu uma estreita colaboração com a STIB e deu resultados satisfatórios sobre a aplicação de tais tecnologias, principalmente para a rede de metro. A VUB também desenvolveu uma primeira versão de um software de simulação com o objetivo de calcular os fluxos de energia entre os veículos e as potenciais economias de energia obtidas com sistemas de armazenamento de energia à bordo dos trens elétricos e externos para os demais.

### 4.1.3. Topologia das linhas e headway

Bruxelas tem uma rede de metro composta por 4 linhas, mas apenas as linhas 2 e 6 foram estudadas para a recuperação de energia a partir da frenagem. A linha 2 consiste em uma linha circular de 11 km com um total de 10 estações, enquanto que a linha 6 compartilha uma parte da linha 2 com uma extensão de 5 km ao norte com 7 estações.

A Figura 1 mostra o mapa da rede:

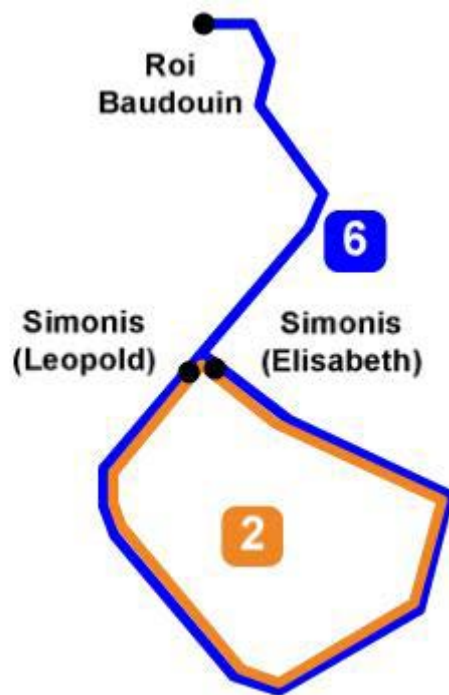
**Figura 1 - Mapa da rede de metro de Bruxelas**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)



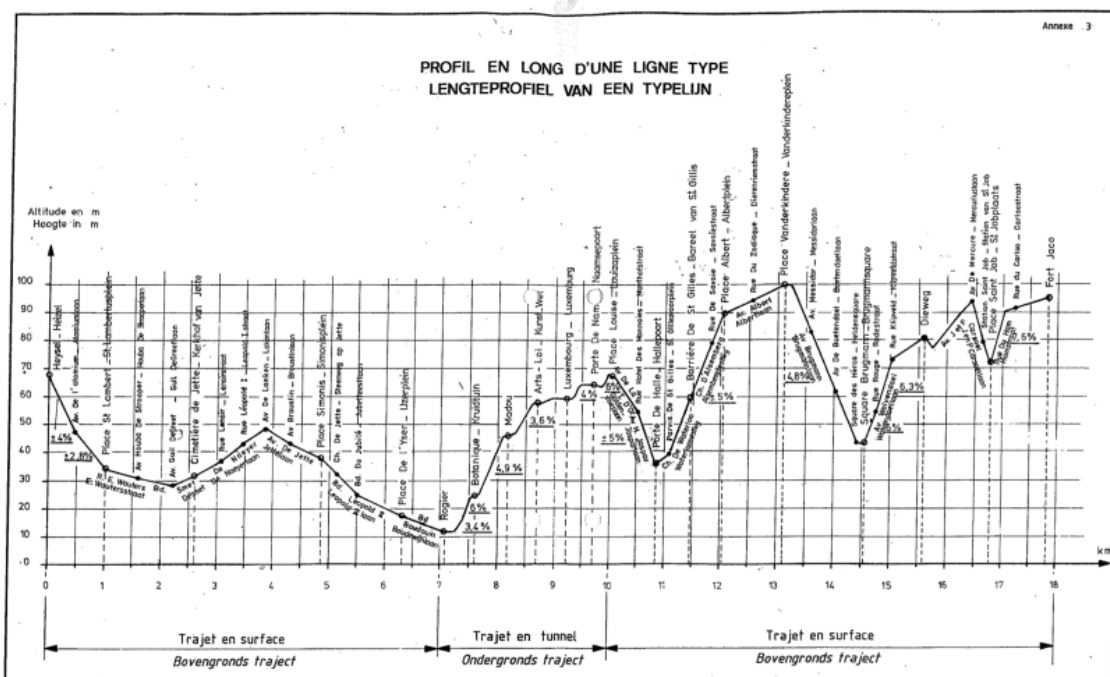
**Figura 2 - Esquema da rede de metro de Bruxelas**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

A rede de metro de Bruxelas tem muitos trechos inclinados, o que traz um impacto importante sobre o consumo de energia e as potenciais economias relacionadas à energia cinética dos veículos, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3:

### Figura 3 - Perfil de uma linha de metro de Bruxelas



As linhas de metrô 2 e 6 têm um trecho em comum, onde as frequências são dobradas. Os headways dos trens são dados na Tabela 1 para diferentes períodos de funcionamento:

**Tabela 1 - Tabela de Headways das linhas de metro de Bruxelas em diferentes períodos de funcionamento**

	Trains Headway	
	2 6	6
Peak	3'	6'
Off-Peak	3' 45"	7' 30"
W.E. & Night	5'	10'

Até 2018, a STIB pretende converter suas linhas de metro 1 e 5 para operar sem condutor. Essas linhas atualmente enfrentam uma falta de capacidade na hora de pico e precisam ser atualizadas para lidar com a demanda prevista na região da capital de Bruxelas, conseguindo tempos de headway abaixo de 2 minutos. Operações automatizadas nas linhas 2 e 6 não estão previstas antes de 2025.



#### 4.1.4. Veículos

No caso da STIB, todos os trens do metro têm capacidade de recuperar energia. No entanto, a última geração de trens do tipo “CAF boa” regenera uma quantidade maior de energia de frenagem já que alguns dispositivos eletrônicos de potência foram otimizados.

Já nos trens elétricos, a situação é menos ideal uma vez que os bondes do tipo PCC primeira geração não recuperam energia de frenagem e representam uma parte significativa da frota.

Seguem as características dos trens:

**Tabela 2 - Características dos trens analisados no caso da STIB**

	M6	U 1,2,3,4
		
Weight	160 t	31,4t
Length	94 m	18 m
Motor power	16 x 135kW	2 x 264 kW per car
Acceleration	max 1.3 m/s <sup>2</sup>	max 1,33 m/sec <sup>2</sup> (0 to 26 km/h)
Deceleration	max -1.2 m/s <sup>2</sup>	-
Trains on lines 2 and 5	None	3 to 5 cars coupled

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

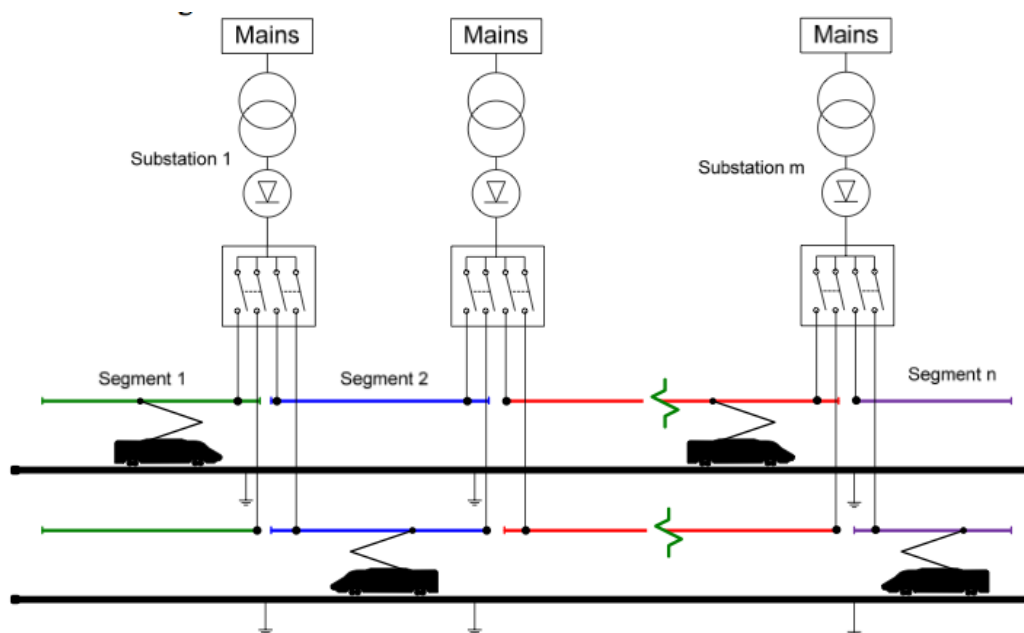
#### **4.1.5. Rede Elétrica**

A rede elétrica é composta por diferentes segmentos elétricos alimentados por duas subestações de diodo não reversíveis. A distância média entre as subestações consecutivas é de cerca de 1 km.

Embora esses segmentos não estejam ligados diretamente um ao outro, eles são conectados eletricamente através das subestações. Assim, os veículos são capazes de enviar energia de um segmento ao outro graças à conexão da subestação.

A região de Bruxelas-Capital é alimentada por uma rede de alta tensão (150 kV e 36 kV) dirigida pela ELIA e também por uma rede de média e baixa tensão dirigida pela SIBELGA. A STIB é 100% alimentada pela ELECTRABEL-SUEZ, fornecendo para a STIB 36kV AC. Os transformadores diminuem esta energia para 11kV e as subestações de tração transformam essa energia em eletricidade útil como 900 Volts DC para a tração do metro, 700 Volts DC para a tração dos trens elétricos e em 230-400 Volts AC para usos mais nobres como os prédios administrativos, depósitos, estações ou corredores de manutenção. A STIB tem a vantagem particular de possuir e assegurar a manutenção de sua rede elétrica e, portanto, pode enviar energia de volta à rede com mais facilidade.

**Figura 4 - Esquema de funcionamento da rede elétrica do metro de Bruxelas**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

A rede de metro de Bruxelas tem uma tensão nominal de 900V e não é propensa a queda de tensão, devido à presença de muitas subestações de alimentação da linha. Quedas de tensão acontecem raramente, apenas quando há sobrecarga de veículos operando na linha. Portanto, as aplicações de armazenamento não parecem ser necessárias para evitar quedas de tensão.

**Tabela 3 - Características da rede elétrica do metro de Bruxelas**

<b>Medium Voltage network</b>	900V
<b>Nominal Traction voltage</b>	824 Vdc
<b>No Load Traction voltage</b>	880 Vdc
<b>Nominal power of substations</b>	2x1.65 MW
<b>Average distance between substations</b>	1,14 km
<b>Feeding system</b>	3rd rail

#### 4.1.6. Tomada de decisões

##### 4.1.6.1. Análise

A STIB trabalhou em conjunto com a VUB (Vrije Universiteit Brussel) e a D-sight para desenvolver um MCA (multi-criteria analysis - análise multicritérios, traduzindo para o português) para a escolha da tecnologia mais adequada para a rede de metro, especialmente as linhas 2 e 6.

Este análise multi-critérios comparou subestações reversíveis, flywheel e outras soluções com supercapacitores sua linha de metrô. Deve-se salientar que os resultados da análise não podem ser replicados em outros contextos, mas podem ser útil para outros operadores que desejam aprender mais sobre a metodologia seguida.

Uma seleção de critérios foi escolhida para esta avaliação com base em sua relevância e disponibilidade de dados. Os critérios, a sua dimensão e o peso específico atribuído são apresentados na tabela abaixo.

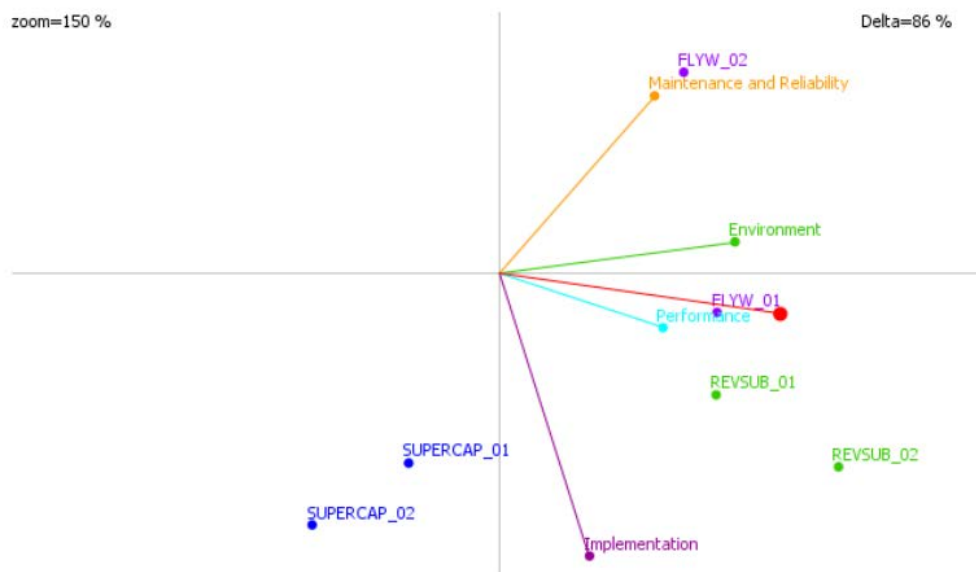
**Tabela 4 - Critérios selecionados para a avaliação da análise multi-critérios da STIB**

Code	Criteria	Weight	Min/Max	Unit	Scale Numerical/qualitative
A.1	Investment cost/Peak Power	33%	Minimize	€/MW	Numerical
A.2	Investment cost/Maximum energy recovery	40%	Minimize	€/kWh/h	Numerical
A.3	Voltage balancing function	13,3%	Maximize	Yes/No	Voltage balancing function
A.4	Auxiliaries consumption/Maximum energy recovery per hour	13,3%	Minimize	h/year	Numerical
	<b>Tot. 100%</b>				
B.1	Volume	30%	Minimize	m3	Numerical
B.2	Mass	20%	Minimize	kg/kWh/h	Numerical
B.3	Stage of development	30%	Maximize	Product/Prototype	Stage of development
B.4	Systems in service worldwide	20%	Maximize	Number	Numerical
	<b>Tot. 100%</b>				
C.1	Mean time between maintenance (MTBM)	20%	Minimize	Times/year	Numerical
C.2	Mean time to maintain (MTM)	10%	Minimize	Hours	Numerical
C.3	Mean time between failure (MTBF)	40%	Maximize	Years	Numerical
C.4	Mean time to repair (MTTR)	10%	Minimize	Hours	Numerical
C.5	Lifecycle	20%	Maximize	Years	Numerical
	<b>Tot. 100%</b>				
D.1	Toxicity	50%	Minimize	Low/Middle/High	Toxicity
D.2	Noise	25%	Minimize	dB	Numerical
D.3	Recycling	25%	Maximize	%	Numerical
	<b>Tot. 100%</b>				
A	Performance	40%			
B	Implementation	20%			
C	Maintenance and reliability	30%			
D	Environment	10%			
	<b>Tot. 100%</b>				

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

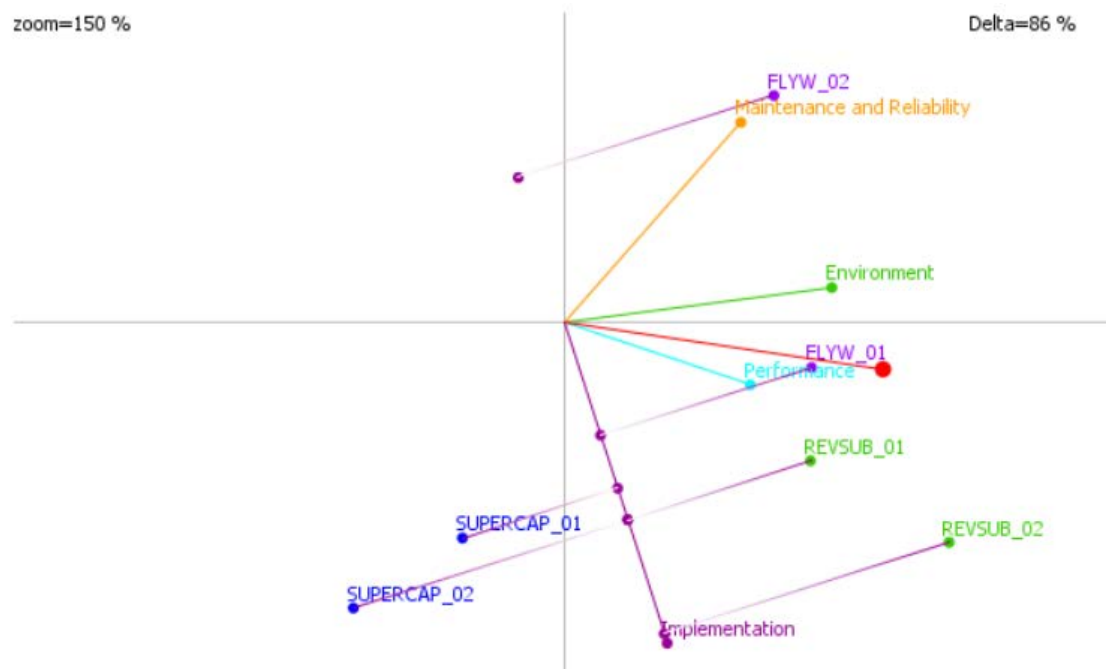
Os critérios são representados pelos eixos. Um eixo indica a direção das alternativas principais para o critério relacionado. Pode-se observar que os eixos de meio ambiente e os eixos de desempenho estão próximos uns dos outros.

Isto significa que, em média, os sistemas que têm bons resultados de desempenho também têm boa pontuação em questão ao meio ambiente.



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Se a projeção de uma alternativa vai longe no eixo, isto significa que ela é bem pontuada para o critério.



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Com base no MCA, pode concluir-se que existem três alternativas relevantes: 2 subestações reversíveis e uma solução de flywheel. Na verdade,

nenhum deles tem aspectos negativos (por exemplo, ter projeções negativas sobre os eixos). Os resultados da MCA mostraram uma vantagem clara das subestações reversíveis em comparação com os flywheels, especialmente em termos de desempenho e de meio ambiente. Como resultado, a STIB decidiu lançar uma licitação exclusivamente para a aquisição de subestações reversíveis (inversores).

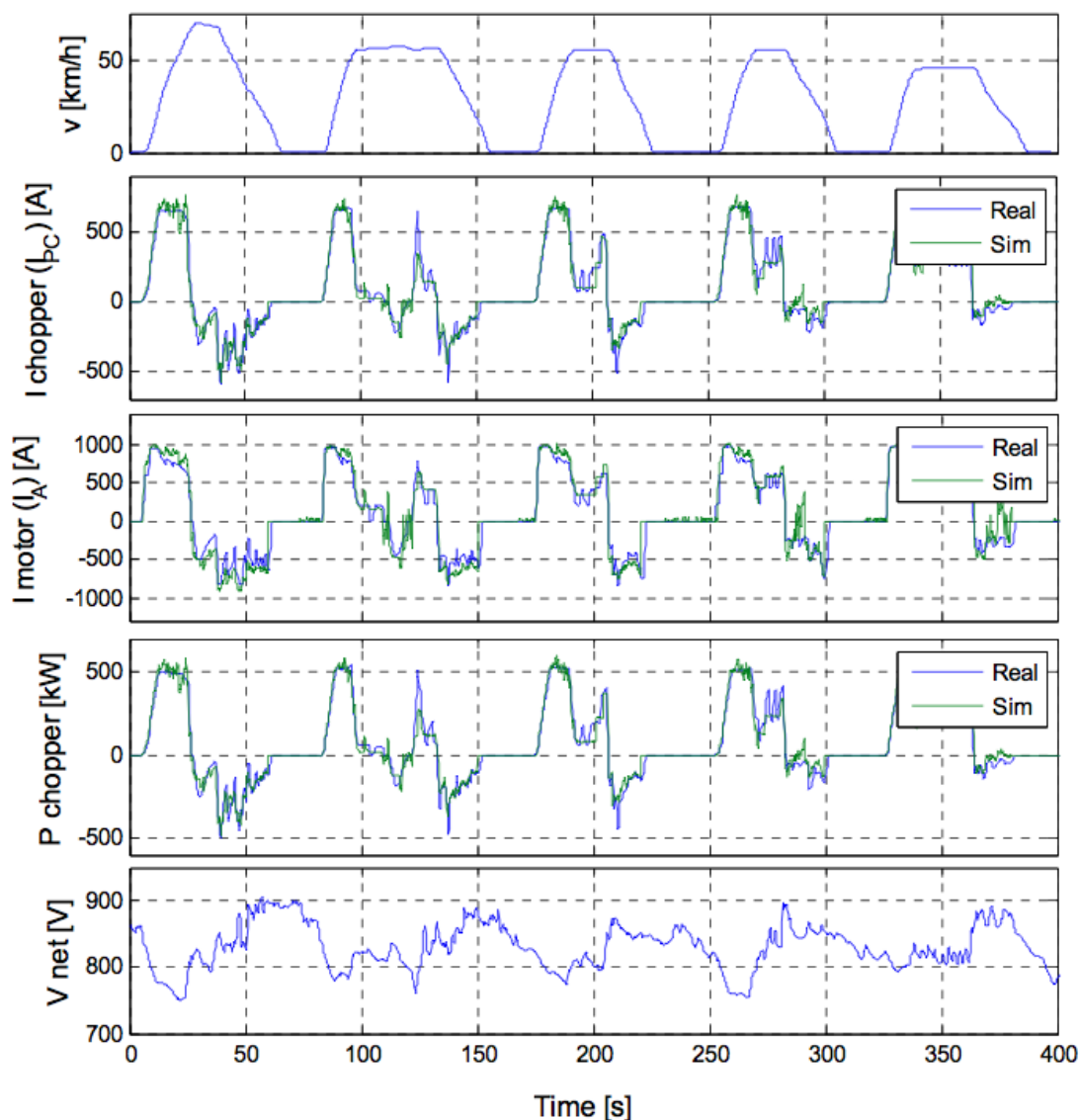
#### **4.1.6.2. Simulação**

Com base em uma cooperação antiga, a STIB pediu a Vrije Universiteit Brussel (VUB) para melhorar o seu software de simulação da rede de metro, a fim de melhor avaliar as diferentes tecnologias. O primeiro passo foi calibrar o modelo de simulação com as medições reais do consumo de energia de rede sem qualquer sistema de recuperação de energia instalado. A fim de avaliar o desempenho do modelo, as medições experimentais foram levadas a um trem do metrô em serviço regular na linha de metro 6. A STIB registrou o consumo de energia das subestações e a distância total percorrida pelos veículos em circulação durante um mês inteiro (maio de 2011) e a distância total percorrida pelos veículos em circulação desse período.

A figura abaixo apresenta um estudo comparativo entre as medições experimentais e os resultados da simulação.



**Figura 5 - Medições experimentais do consumo de energia da rede no caso da STIB**



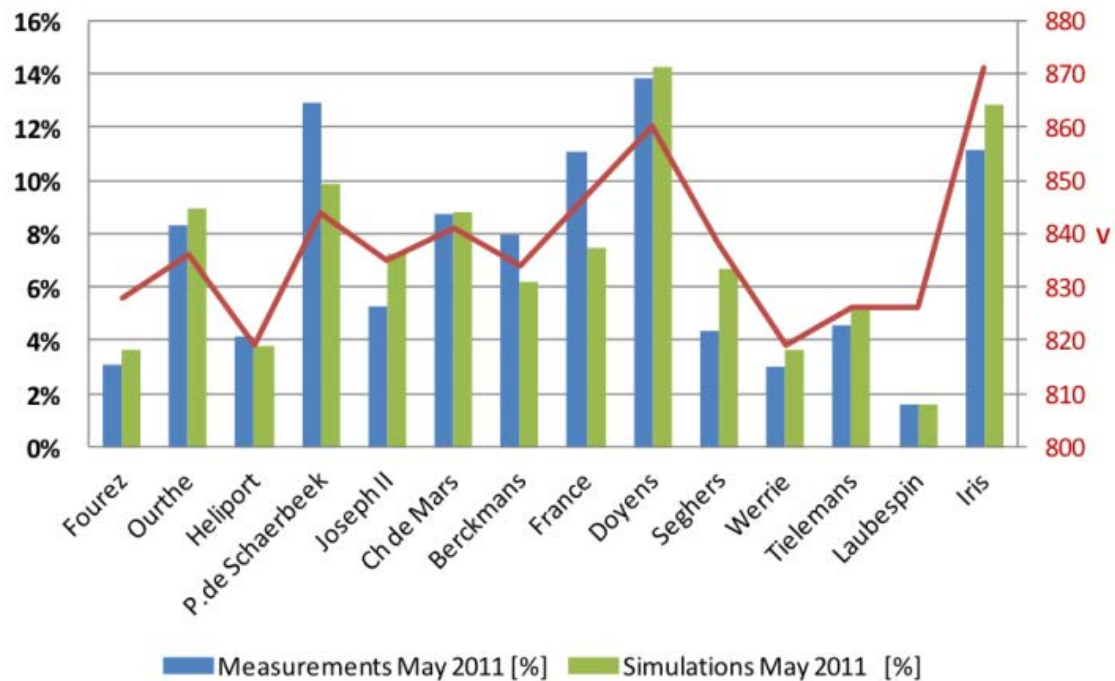
Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Os resultados do modelo se aproximavam bastante das medições reais, tanto no veículo quanto no nível da subestação. Isto foi possível graças às medidas precisas da OCV (open-circuit voltage - tensão de circuito aberto, traduzindo para o português) e resistências internas disponíveis para cada subestação.

Outro fato importante a observar é a variação na quantidade de energia fornecida por subestações consecutivas e a influência da subestação na OCV. Observa-se que, em geral, as subestações com uma maior OCV fornecem mais

energia para a rede. Esses resultados foram muito úteis para calibrar o modelo de simulação e certificar que os seus resultados foram semelhantes às operações reais.

**Figura 6 - Comparação entre a medição real e os resultados da simulação, VUB**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

As simulações das linhas de metro 2 e 6 também demonstraram que a receptividade da linha (trocas de energia entre a aceleração e frenagem de veículos) foi maior nos períodos de pico quando mais veículos transitavam simultaneamente. A relação entre a energia restaurada e a quantidade da energia de frenagem disponível foi de cerca de 69% com baixo volume de tráfego, 71% no caso do volume de tráfego médio e 75% no caso de grande volume de tráfego.

**Tabela 5 - Resultados da simulação com volume de tráfego baixo**

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	AVERAGE	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	AVERAGE
Number of cars/train	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Occupancy	seats	seats	seats	seats	seats	seats	seats	seats	seats	seats
Maximum vehicles voltage	925	925	925	925	925	905	905	905	905	905
Energy delivered by Substations [kWh]	2582.27	2615.36	2558.02	2622.94	2594.65	2707.62	2662.71	2723.65	2662.03	2689.00
Energy taken back by substations [kWh]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Substation Losses [kWh]	52.85	54.21	50.63	53.76	52.86	53.77	51.51	54.52	51.24	52.76
Line Losses [kWh]	130.11	130.14	131.43	131.44	130.78	120.64	122.79	122.43	122.23	122.02
Consumed energy by vehicles [kWh]	3210.00	3226.83	3231.31	3251.92	3230.01	3226.53	3232.61	3241.69	3237.86	3234.67
Restored energy by vehicles [kWh]	-815.03	-800.90	-859.24	-818.93	-823.52	-699.14	-749.19	-700.79	-754.56	-725.92
Braking energy available [kWh]	-1188.74	-1183.26	-1190.89	-1196.57	-1189.87	-1182.71	-1184.94	-1192.74	-1204.10	-1191.12
Restored/Consumed [%]	-25.39%	-24.82%	-26.59%	-25.18%	-25.50%	-21.67%	-23.18%	-21.62%	-23.30%	-22.44%
Restored/Available braking [%]	68.56%	67.69%	72.15%	68.44%	69.21%	59.11%	63.23%	58.75%	62.67%	60.94%
Total distance by all vehicles [km]	181.90	179.25	179.68	180.18	180.25	179.39	179.33	180.04	180.92	179.92
kWh/km	14.20	14.58	14.23	14.55	14.39	15.08	14.83	15.11	14.70	14.93
kWh/km*Car	3.55	3.65	3.56	3.64	3.60	3.77	3.71	3.78	3.67	3.73

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

**Tabela 6 - Resultados da simulação com volume de tráfego médio**

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	AVERAGE	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	AVERAGE
Number of cars/train	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Occupancy	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>	seats + 2p/m <sup>2</sup>
Maximum vehicles voltage	925	925	925	925	925	925	905	905	905	905	905
Energy delivered by Substations [kWh]	5042.57	5117.07	4990.67	5130.83	4988.98	5054.02	5317.54	5238.75	5334.85	5241.05	5283.05
Energy taken back by substations [kWh]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Substation Losses [kWh]	175.36	181.03	161.45	182.08	168.46	173.68	184.88	173.98	181.94	176.54	179.33
Line Losses [kWh]	381.49	381.16	385.22	376.36	380.61	380.97	363.26	366.05	365.06	361.93	364.07
Consumed energy by vehicles [kWh]	6177.19	6171.47	6227.28	6165.95	6156.69	6179.72	6192.37	6244.76	6205.97	6189.95	6208.26
Restored energy by vehicles [kWh]	-1694.39	-1620.74	-1785.69	-1597.42	-1719.82	-1683.61	-1427.39	-1549.47	-1422.66	-1491.54	-1472.77
Braking energy available [kWh]	-2352.71	-2356.35	-2366.24	-2344.50	-2331.42	-2350.24	-2369.70	-2360.35	-2358.57	-2367.13	-2363.94
Restored/Consumed [%]	-27.43%	-26.26%	-28.68%	-25.91%	-27.93%	-27.24%	-23.05%	-24.81%	-22.92%	-24.10%	-23.72%
Restored/Available braking [%]	72.02%	68.78%	75.47%	68.13%	73.77%	71.63%	60.24%	65.65%	60.32%	63.01%	62.30%
Total distance by all vehicles [km]	238.16	238.02	240.24	238.72	237.58	238.54	240.27	239.85	239.12	239.53	239.69
kWh/km	21.16	21.49	20.76	21.48	20.99	21.18	22.12	21.83	22.30	21.87	22.03
kWh/km*Car	4.23	4.30	4.15	4.30	4.20	4.24	4.42	4.37	4.46	4.37	4.41

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

**Tabela 7 - Resultados da simulação com volume de tráfego alto**

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	AVERAGE	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	AVERAGE
Number of cars/train	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Occupancy	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>	seats + 4p/m <sup>2</sup>
Maximum vehicles voltage	925.00	925.00	925.00	925.00	925.00	905.00	905.00	905.00	905.00	925.00
Energy delivered by Substations [kWh]	7059.50	7120.71	7178.65	7176.27	7133.79	7484.01	7437.81	7489.44	7574.83	7496.52
Energy taken back by substations [kWh]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Substation Losses [kWh]	311.62	314.12	330.07	322.58	319.60	343.99	348.12	348.87	372.06	353.26
Line Losses [kWh]	645.11	641.86	655.20	647.32	647.37	636.81	622.47	626.71	629.93	628.98
Consumed energy by vehicles [kWh]	8695.44	8703.27	8711.71	8773.39	8720.95	8717.15	8680.12	8707.15	8658.23	8690.66
Restored energy by vehicles [kWh]	-2594.83	-2541.03	-2520.92	-2569.09	-2556.47	-2217.26	-2216.10	-2196.92	-2089.06	-2179.84
Braking energy available [kWh]	-3392.07	-3389.70	-3391.50	-3408.65	-3395.48	-3415.44	-3424.83	-3379.17	-3378.52	-3399.49
Restored/Consumed [%]	-29.84%	-29.20%	-28.94%	-29.28%	-29.31%	-25.44%	-25.53%	-25.23%	-24.13%	-25.08%
Restored/Available braking [%]	76.50%	74.96%	74.33%	75.37%	75.29%	64.92%	64.71%	65.01%	61.83%	64.12%
Total distance by all vehicles [km]	297.79	297.53	298.66	299.60	298.39	298.29	298.15	297.01	296.26	297.43
kWh/km	23.70	23.93	24.03	23.94	23.90	25.08	24.94	25.21	25.56	25.20
kWh/km*Car	4.74	4.79	4.81	4.79	4.78	5.02	4.99	5.04	5.11	5.04

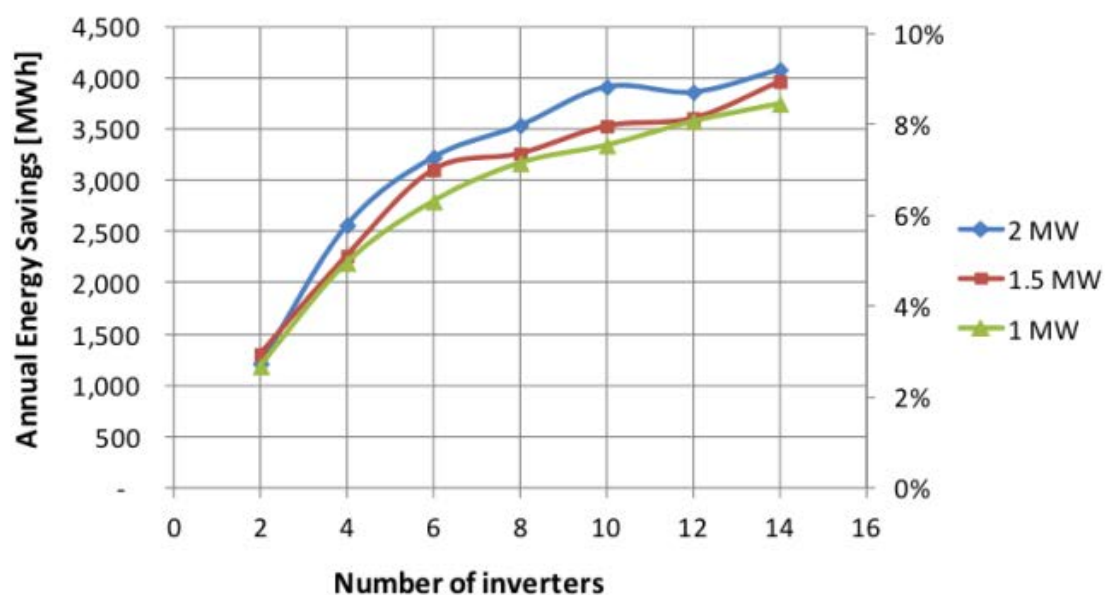
Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

A STIB, em seguida, investigou os locais com maiores potenciais para a implementação de um sistema de recuperação de energia pelo uso de simulação. O desafio consistia em encontrar a solução que oferecesse a maior

economia de energia com a quantidade mínima de inversores possível. Se todas as subestações de linhas de metrô 2 e 6 fossem capazes de enviar energia de volta à rede, poderia ser alcançado em torno de 10% de economia de energia. No entanto, era necessário encontrar a melhor solução comercial, proporcionando uma economia de alta energia com um baixo investimento, ou seja, com o mínimo de inversores possível e com a menor potência possível.

No caso da STIB, uma boa solução pareceu estar na gama de 6 a 8 inversores instalados de 1 a 1,5 MW de potência nominal, como pode ser observado a partir da Figura a seguir. A economia aumenta com o número de inversores muito claramente até seis ou oito inversores instalados. A partir desse ponto, o aumento do número de inversores, ainda aumenta a economia, mas não na mesma proporção.

**Figura 7 - Evolução das economias anuais de energia com o aumento do número de inversores, VUB**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Para encontrar os locais ideais, foi necessário fazer várias simulações com inversores instalados em diferentes locais e em diferentes condições de tráfego. A metodologia consistiu na execução de uma simulação com um inversor instalado em cada subestação. Os dois inversores que recuperaram a menor energia foram então removidos e uma nova simulação foi realizada. O

processo foi repetido de forma incremental seguindo a mesma lógica para identificar os melhores locais.

Sistemas móveis e operações sem catenária para bondes elétricos:

No âmbito do projeto T2K, a STIB tem vindo a apostar na sua rede de metro, onde as operações sem catenária não são uma opção. Em estudos anteriores, a STIB investigou a utilização da tecnologia de supercapacitores a bordo em sua rede de bondes elétricos, especialmente na linha 7 (antiga linha 23). Esta linha de 20,8 km, operada com o novo Bombardier Flexity T3000, é benéfica por fornecer taxas de ocupação elevadas e permitir o uso em vários tipos de seção: túneis, faixas exclusivas e pistas mistas.

Quatro configurações de sistemas de supercapacitores foram comparadas com um valor de energia variando de 0,91 kWh a 1,56 kWh e a economia de energia foram simulados em um software Matlab / Simulink. A economia de energia esperada no nível da subestação foi conferida e variaram de 21% a quase 26%.

**Tabela 8 - Economia de energia para um T3000 na linha**

Module option	Energy content (kWh)	Energy savings at substation level (%)
Module A	1,2	25,60%
Module B	1,23	24,83%
Module C	1,56	25,88%
Module D	0,91	24,65%

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Configurações do módulo A e D foram ainda avaliadas, uma vez que parecia ser a melhor solução considerando as economias de energia geradas e seu uso de energia. Economias de energia anuais e tempo de vida são apresentados na tabela abaixo com um tempo de vida do conjunto ESS de 15 anos e considerando a eficiência das células de supercapacitores decrescentes ao longo do tempo. Trocas de energia potencial entre os veículos não foram consideradas nestas simulações.

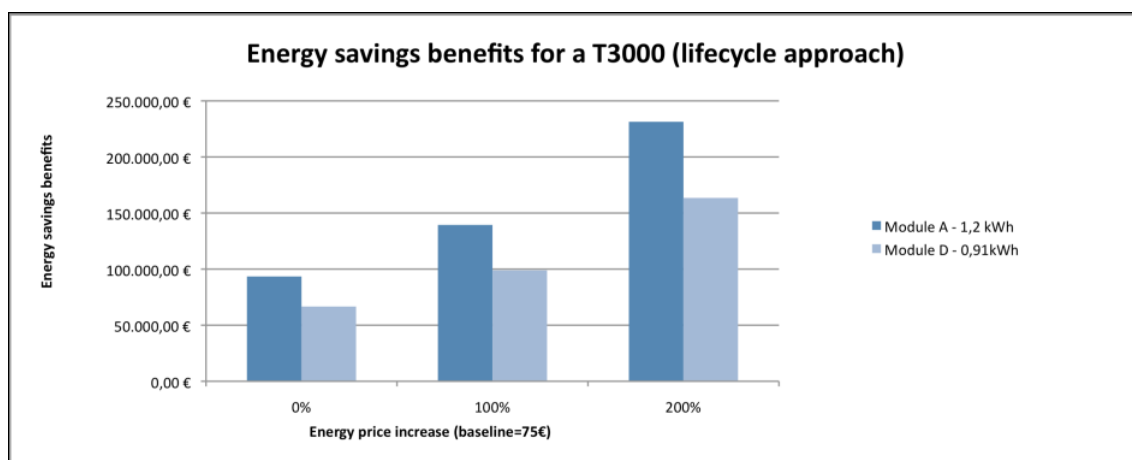
**Tabela 9 - Economia anual de energia devido à inclusão de um ESS a bordo de um bonde**

Module configuration	Annual mileage (km)	Marginal consumption (kWh/km)	Annual consumption (kWh)	Annual energy savings (kWh) [Full efficiency]	Annual energy savings (kWh) [End of life]	Lifetime energy savings (kWh) [15 years]
Module A	50 000	5,203	260 156	66 612	61 189	958 505
Module D	50 000	5,203	260 156	64 116	54 373	888 665

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Para avaliar os benefícios econômicos advindos da redução do consumo de energia dos bondes, um preço de base foi fixado em 75 €/ MWh e vários aumentos de preços foram considerados. Os resultados em uma base de 15 anos de vida são mostrados na figura a seguir:

**Figura 8 - Benefícios da economia de energia para um ESS (Energy Storage System) a bordo de um bonde na linha 23**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Apesar de poupar energia significativamente, o estudo concluiu que os custos de implementação de um ESS (Energy Storage System - Sistema de Armazenamento de Energia, traduzindo para o português) a bordo de um trem elétrico excediam de longe os benefícios esperados, mesmo no caso de um grande aumento dos preços da energia. Isso porque a tecnologia ainda era muito cara, devido principalmente aos altos custos de desenvolvimento e



implementação. Estes custos poderiam ser reduzidos caso vários operadores de transportes investissem maciçamente na tecnologia e se um sistema padrão pudesse ser projetado para atender as expectativas dos clientes. No caso da STIB, dados os benefícios medidos nesta análise, o custo de investimento de uma ESS a bordo de um bonde não deve exceder mais ou menos 100.000 € por veículo para se tornar uma solução benéfica para a economia de energia, assumindo que o sistema iria durar 15 anos. Outro fator que poderia fazer com que o sistema fosse mais atraente é a possibilidade de operar o trem sem linhas aéreas em determinadas camadas da rota. Esta exigência não está na agenda da região de Bruxelas, onde várias linhas de elétricos estão em serviço

#### **4.1.6.3. Licitação**

Como a STIB é dona da sua rede elétrica de média tensão e pelos outros motivos apresentados acima, os inversores pareciam ser a solução mais rentável. Uma licitação foi lançada e três fornecedores foram convidados para testar seu sistema na rede durante várias semanas, a fim de comparar a sua eficiência e economia gerada. Esta abordagem empírica produziu informações úteis sobre a energia de frenagem a ser recuperada através da utilização de inversores. A análise chegou à conclusão de que o melhor sistema no contexto específico da rede de metro de Bruxelas foi o conversor fabricado pela INGETEAM. 5 novos inversores vão ser então adquiridos e instalados ao longo da rede.

**Tabela 10 - Dados técnicos do inversor da INGETEAM**

### Technical data of the INGETEAM inverter

- Technology: IGBT
- Voltage range: 400-1000 V DC
- Maximum power: 1.5 MW
- Feedback current : 680A AC
- Efficiency rate: 92% to 96% \*
- Weight: 4.8 tons
- Noise : <65dB(A)

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

\*A eficiência do inversor na potência de pico é de 98,5%. Toda a eficiência do sistema, incluindo os elementos indutivos (indutância DC e transformador) variam entre 92% a 96%, dependendo do ponto de trabalho e o projeto do sistema.

#### **4.1.6.4. Implementação**

Para se ter uma abordagem empírica e devido à dificuldade de selecionar os melhores fornecedores apenas a partir dos resultados da simulação, a STIB decidiu comprar um sistema de cada fornecedor e para testá-los nas mesmas condições para fins de comparação. Todos os três sistemas foram instalados na mesma subestação (Laubespain) na linha 6, que era grande o suficiente para permitir a implementação de três sistemas. Após a entrega e uma vez que a instalação foi concluída, um teste foi organizado para cada fornecedor durante a noite com apenas um metro em execução na rede.

Isto foi mais seguro em caso de uma falha grave, pois não causaria nenhum impacto no serviço diurno. Era também mais fácil para o fornecedor para testar exaustivamente o seu sistema e se certificar de que estava recuperando energia a partir da fase de travagem do veículo e não a partir de uma subestação nas proximidades. Alguns problemas menores aconteceram durante a implementação, mas puderam ser facilmente corrigidos.



Então, os três sistemas foram testados em condições reais durante 3 meses. Cada sistema foi testado durante um dia inteiro e no outro dia, o fornecedor era trocado. A fim de ter boas medições, cada sistema foi ligado durante 15 minutos, e em seguida desligado durante 15 minutos. Deste modo a STIB poderia reunir informações sobre o consumo da rede elétrica com e sem energia de frenagem recuperada dos inversores. Esta técnica permitiu observar que as estações vizinhas estavam consumindo um pouco mais quando o inversor estava ligado. Isto é devido ao fato de o nível de tensão de limiar a partir do qual o inversor recupera a energia tem de ser ajustada para o mais baixo possível para recuperar a energia de frenagem máxima. Uma vez que a OCV das subestações eram ligeiramente diferentes, o ponto ótimo em termos de poupança de energia seria tolerar um certo nível de energia retiradas das subestações adjacentes.

A STIB também percebeu que a ligação de três inversores na mesma subestação era uma tarefa difícil, devido ao fato de que os cabos de média tensão tinham de ser ligados para os três sistemas. Isto levou a custos mais elevados do que o esperado.

**Figura 9 - Adaptação das ligações dos cabos de alta tensão para o transformador, STIB**



#### **4.1.7. Resultados**

Os resultados de todos os fornecedores foram satisfatórios.

Um pequeno ajuste do sistema foi necessário quando a STIB notou que uma diferença de 5V ao definir o limite de recuperação de energia poderia resultar em uma redução de 20% da economia de energia. Como resultado, recomendou-se colaborar ativamente com o fornecedor para se certificar de que o sistema está configurado corretamente e que nenhuma correção deve ser feita em relação aos parâmetros.

A STIB pretende implantar esta tecnologia inovadora em toda a rede de metro. Quando os seis sistemas forem instalados ao longo das linhas de metro 2 e 6, a STIB espera recuperar cerca de 3.400.000 kWh por ano. Isto corresponde a uma redução de 9% da energia de tração de metro. O tempo de retorno é de 5 anos (sem financiamento).

**Tabela 11 - Extrapolação dos resultados da implantação de sistemas de recuperação de energia de frenagem das linhas 2 e 6, STIB**

<b>Technical Data</b> (extrapolation for deployment on whole lines 2 and 6)	
Investment costs (€)	€1,800,000
Energy savings (%)	9%
Annual energy savings (kWh)	3,400,000 kWh
Annual CO <sub>2</sub> savings (TCO <sub>2</sub> )	568 TCO <sub>2</sub>
Payback time (years)	5 years

## 4.2. moBiel - Bielefeld

### 4.2.1. Contexto

Prestando serviços para 325.000 habitantes de Bielefeld e mais 125.000 nos arredores, a moBiel é o maior fornecedor de transporte público na região alemã de Westphalia Leste (WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks, 2014, p.55). A moBiel é uma operadora de propriedade da cidade e detém a parte da infraestrutura de transportes públicos.

Quatro linhas ferroviárias formam a espinha dorsal da rede e passam sob o centro da cidade através de uma seção do túnel com sete estações de metro. A rede de ônibus é formada por 79 linhas. A moBiel visa aumentar o número de passageiros com obras de extensões de linha da rede existente.

### 4.2.2. Experiência passada

A moBiel não tem nenhuma experiência anterior na área de recuperação de energia de frenagem antes de iniciar o projeto Ticket to Kyoto.

### 4.2.3. Topologia das linhas e headway

A Mobiel opera uma rede de bondes (light rail) de quatro linhas com uma extensão total de 71,6 km. Todas as linhas se cruzam no centro da cidade em uma seção do túnel e são compostas por 62 estações. A distância média entre

duas estações é de 450m. As linhas dos bondes são relativamente planas, exceto as pistas para entrar nas seções de túnel. O headway em cada linha é de cerca de 5 minutos no horário de pico e 10 minutos fora do horário de pico.

**Figura 10 - Planta da rede de bondes da moBiel composta por 4 linhas**



#### 4.2.4. Veículos

Todos os veículos tem capacidade de regenerar energia a partir da frenagem.

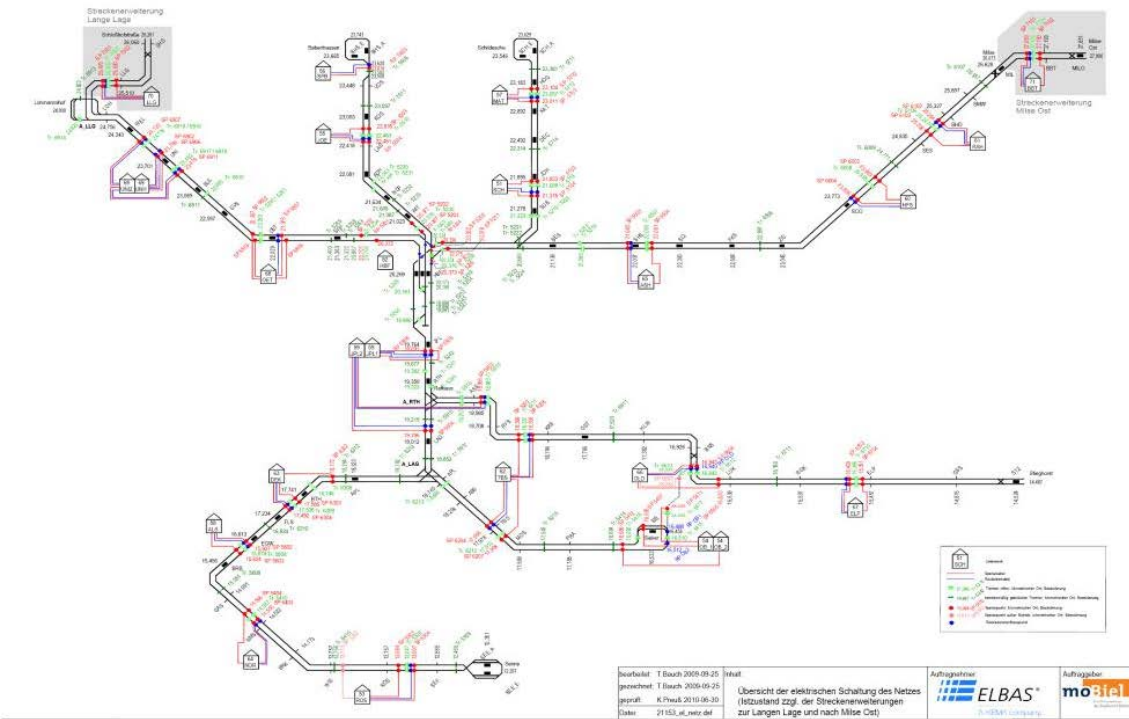
Tabela 12 - Visão geral dos dados dos bondes da moBiel, moBiel

	M8C	M8D	GTZ8-B (Vamos)
Fahrzeuganzahl / number of vehicles	24	36	16
Leergewicht / tara weight	38 t	34 t	55 t
Gesamtgewicht / total weight	52,7 t	49 t	80,7 t
Länge / length	26,5 m	26,6 m	34,3 m
Sitzp-/Stehplätze / seats/standing places (4/m)	52 / 86	63 / 91	68 / 162
passenger capacity of vehicle	138	154	230
Antriebsleistung	2 x 150 kW	4 x 95 kW	8 x 80 kW
Antriebsleistung gesamt	300 kW	380 kW	640 kW
Beschleunigung / acceleration	max. 1,1 m/s <sup>2</sup>	max. 1,1 m/s <sup>2</sup>	max. 1,1 m/s <sup>2</sup>
Verzögerung / delay	max. -1,26 m/s <sup>2</sup>	max. -1,26 m/s <sup>2</sup>	max. -1,26 m/s <sup>2</sup>
Nennspannung DC / nominal voltage DC	750 V	750 V	750 V
Anfahrstrom maximal / starting current	500 A	600 A	900 A
Rückspeisespannung / voltage of feeding bac	925 V	925 V	925 V
Rückspeisestrom maximal / feeding back cur	720 A	900 A	1.600 A
Rückspeisestrom maximal, wenn gekuppelt	1440 A	900 A	1.100 A
Traction / traction	1 or 2 cars coupled	2 cars coupled	1 or 2 cars coupled

4.2.5. Rede Elétrica

A rede elétrica é composta por 7 subestações. As catenárias estão interligadas.

Figura 11 - Vista da configuração da rede elétrica da rede de bondes da moBiel, moBiel



**Tabela 13 - Visão geral dos dados da rede da moBiel, moBiel**

<b>Medium Voltage network</b>	10 kV
<b>Nominal Traction voltage</b>	750 VDC
<b>Zero Load Traction voltage</b>	825 VDC
<b>Maximum Traction voltage when braking</b>	925 VDC
<b>Number of substations</b>	19
<b>Rated power of substations</b>	1500 to 6000 A
<b>Average distance between substations</b>	between 600 m and 1,200m
<b>Traction supply system</b>	bidirectional feeding
<b>Feeding system</b>	Catenaries
<b>Revenue-earning kilometres in 2013</b>	4,928,944 km
<b>Traction energy consumption in 2013</b>	16,165,043 kWh
<b>Number of passengers in 2013</b>	33,149,297 passengers
<b>Degree of capacity utilisation</b>	24%

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

#### **4.2.6. Tomando decisões**

##### **4.2.6.1. Analise**

No caso da malha da moBiel, observou-se que era necessária uma distância mínima de 6 km entre dois sistemas, para garantir que os sistemas de regeneração não se influenciassem mutuamente.

Outros aspectos relativos à escolha da localização são a poluição sonora para o meio ambiente da região e os problemas de entrega e instalação do sistema. A moBiel inicialmente pensou em implantar um sistema de armazenamento de energia em um container no final da linha 2, mas esta ideia não seguiu adiante por causa dos custos adicionais significativos para a base do container e o solo.

Ao seleccionar um local adequado para o inversor, deve ser verificado se o transformador retificador será corretamente dimensionado de acordo com os valores máximos do inversor.



#### **4.2.6.2. Simulação**

A Mobiel encomendou um consultor independente (Elba), que realizou uma análise dos potenciais de economia e os locais ideais com base nos dados da rede. Este método foi necessário porque os resultados de economia fornecidos pelos fabricantes variavam

substancialmente.

Além disso, uma avaliação dos valores regenerativos do veículo e a avaliação da energia de resistência de frenagem foi realizada pela moBiel para cada linha. Estes resultados confirmaram os resultados da simulação.

#### **4.2.6.3. Licitação**

A licitação começou com um convite à escala da UE para apresentação de propostas para o fornecimento e instalação dos sistemas. Durante esta chamada, especialmente a capacidade econômica e técnica foram consideradas. Cinco dos quinze fornecedores foram classificados como eficientes na competição.

O concurso foi dividido em duas partes: sistemas de armazenamento de energia e inversores.

No processo de avaliação, o critério de eficiência econômica foi considerado prioritariamente, com uma peso de 60%. Critérios adicionais incluíram engenharia, garantia de qualidade e cumprimento de prazos.

Em relação ao sistema de armazenamento de energia, o sistema de flywheel fornecido pela Piller ficou em primeiro lugar em relação aos outros sistemas. Já o inversor, o sistema fornecido pela INGETEAM foi a melhor oferta. Portanto a Mobiel optou por um flywheel da PILLER e dois inversores da INGETEAM. Um terceiro inversor da INGETEAM foi adquirido depois.

A moBiel optou por dois tipos diferentes de tecnologia (armazenamento de energia e inversores) para fins de investigação. Desta forma, ela tem a

oportunidade de ganhar experiência em termos de ciclo de vida, eficiência e manutenção, comparando os dois sistemas.

Ao selecionar o melhor candidato, um fator crucial é que a empresa tenha experiência suficiente no fornecimento de poder de tração além do conhecimento em relação aos picos de energia, horários de pico, quedas e problemas eletromagnéticos que são de grande importância no dimensionamento do sistema e na escolha dos elementos certos. As referências do fornecedor devem ser cuidadosamente verificadas.

Uma vez que estes produtos ainda não estão prontos para a produção em série, algumas modificações podem ser tidas em conta antes da entrega.

#### **4.2.6.4. Implementação**

Ao conectar um sistema de recuperação de energia de frenagem é essencial certificar-se de que a subestação foi corretamente desligada. Isto é necessário para levar em conta a segurança dos trabalhadores e para manter as operações de transporte em ideais condições, mesmo no caso de falha da subestação.

Tanto o inversor quanto o armazenamento de energia são isolados eletricamente da subestação e integrados no circuito de proteção da subestação. Os circuitos de condução que saem e chegam às subestações adjacentes foram protegidos por interruptores de pista de 10 kV. A fim de controlar com precisão a energia recuperada e para controlar o funcionamento do flywheel e do inversor, os mesmos foram integrados no sistema de controle da subestação. Para fins de monitoramento remoto, todos os sistemas foram também ligados ao controle central que pode proporcionar várias mensagens de erro e fornecer os valores medidos. Conectar um sistema de solução de problemas por acesso remoto DSL pode simplificar fortemente a monitoração.

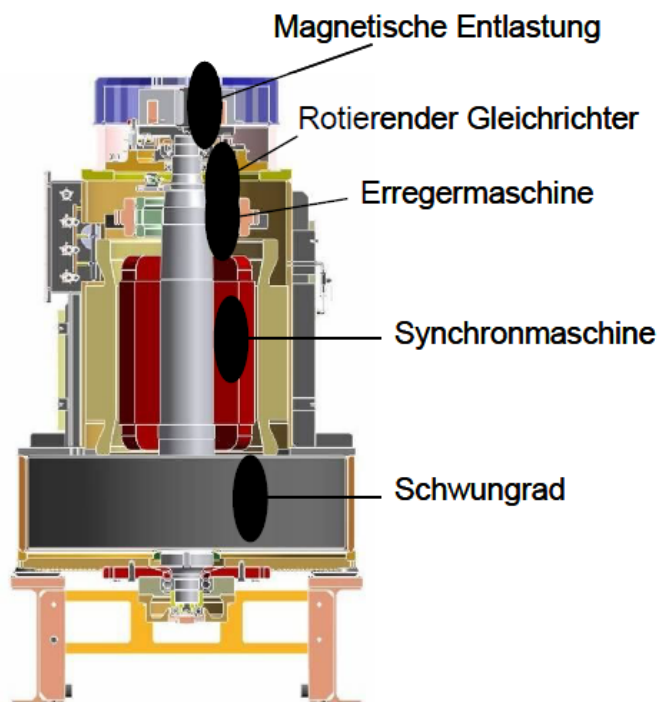
Todos os dados são arquivados em um computador dedicado processando todos os erros do sistema.

##### **4.2.6.4.1. Sistema de Flywheel**

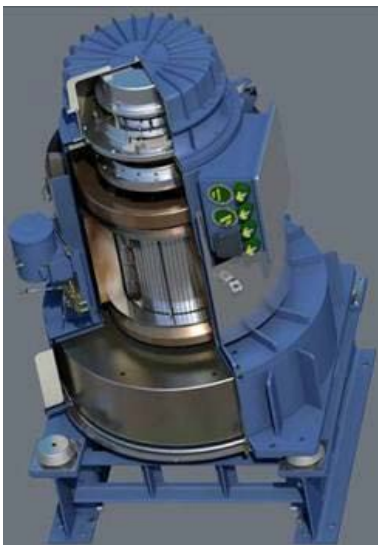


O flywheel está localizado na extremidade de uma linha, mas esta linha será estendida em 1,5 km num futuro próximo. Devido ao seu peso (6 toneladas), o solo abaixo da subestação teve que ser consolidado com concreto. Amortecedores de vibração adicionais foram incorporados de forma a minimizar a transmissão de vibrações do edifício. A estrutura do solo também teve de ser reforçada para suportar elevadas cargas.

**Figura 12 - Vista do sistema de flywheel PILLER**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)



**Tabela 14 - Dados técnicos do sistema de flywheel PILLER**

- Effective energy: 4.6 kWh
- Maximum power: 1MW (for 16 seconds)
- Maximum number of rotation (storing): 3,600 round/minute
- Minimum number of rotation (discharging): 1,800 round/minute
- Maximum discharging current : 1,500A
- Efficiency rate: 84%
- Weight : 10 tons
- Noise : <95dB(A)

Devido à dissipação de potência relativamente elevada do sistema de armazenamento de energia, a instalação de um condicionador de ar é necessária a fim de manter a temperatura ambiente a cerca de 26 ° C. A ventilação natural ou mecânica não foi suficiente devido à quantidade de calor que é produzida. Durante os meses de inverno, o calor gerado pelo sistema é utilizado para o aquecimento de subestações adjacentes. O consumo de energia do sistema de ar condicionado deve ser levado em conta no balanço energético.

No caso da moBiel, o dispositivo de armazenamento de energia não é utilizado para a estabilização da tensão, mas sim exclusivamente para economizar energia.

As economias são medidas a partir do sistema de controle interno do dispositivo. No entanto, a precisão dos dados foi reforçada com um dispositivo de medição externa e dispositivos de monitoramento instalados nos veículos. No planejamento do armazenamento de energia, deve-se verificar se o sistema está equipado com um dispositivo de proteção para absorver os efeitos da variação da intensidade da corrente elétrica (relação  $di / dt$ ) e ao seu valor máximo ( $I_{max}$ ). Se, durante a descarga do sistema de armazenamento, a alimentação elétrica da subestação for interrompida e um curto-circuito aparecer na linha ao mesmo tempo, este dispositivo de proteção deve cuidar da proteção da linha. Para otimizar a eficiência do flywheel, uma descarga automática inteligente está prevista para quando o sistema não estiver funcionando. Isso permite que o

armazenamento no flywheel esteja totalmente descarregado com o último trem e carregado novamente com o primeiro trem na manhã seguinte. O sistema de flywheel da Piller trabalha com valores de referência fixos para iniciar e parar o processo de carga e descarga. Em uma nova aquisição, a moBiel adaptará aos equipamentos dispositivos que permitam que os sistemas sejam adaptados à diferentes condições operacionais (inverno e verão, por exemplo).

O sistema é muito barulhento (96 dB (A)) e obriga os funcionários a usar proteção acústica quando perto do equipamento.

Pouco tempo após a instalação do flywheel, um motorista relatou espasmos anormais do seu veículo durante a frenagem. Estes distúrbios ocorreram exclusivamente com o mais recente tipo de trem elétrico Vamos (Vossloh Kiepe). Nos tipos mais antigos de veículos (ABB), esses distúrbios não eram aparentes. Através de várias medições nos trens e no flywheel, pode ser mostrado que um balanço ocorreu durante o processo de frenagem do veículo e o processo de carga do armazenador de energia.

A primeira abordagem da Piller visou aumentar a frequência de relógio do inversor IGBT do programado de fábrica 400 Hertz para 1600 Hertz. Isto permitiu uma melhoria ligeiramente perceptível, mas o problema não foi completamente resolvido. Num segundo momento, a indutância do circuito de entrada foi aumentada substancialmente. Esta medida trouxe também uma ligeira melhoria, mas o problema não pode ser completamente fixado.

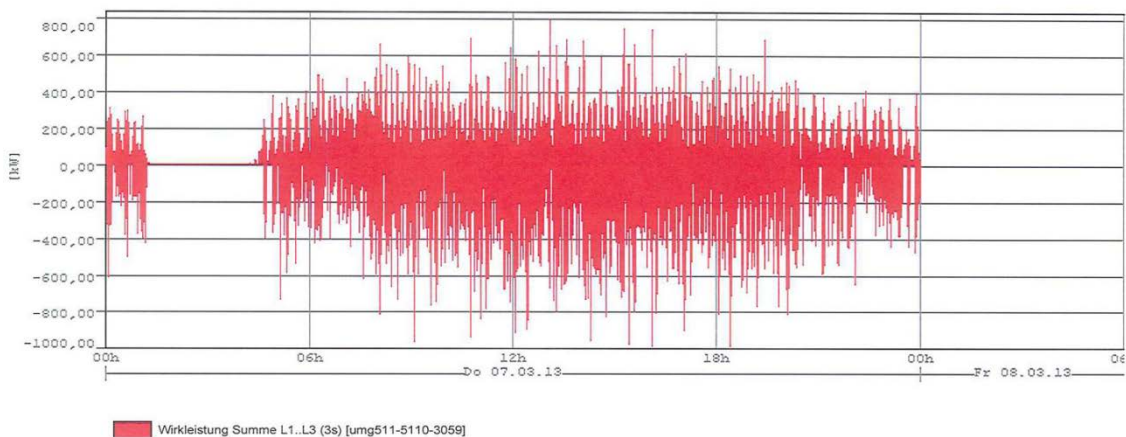
Mobiel notou que o problema estava ocorrendo apenas com veículos dirigindo nas proximidades da subestação onde o flywheel estava instalado. Foi proposto então instalar para teste um resistor de travagem do veículo em paralelo ao filtro de entrada do sistema de armazenamento de energia. As medidas, tanto no veículo quanto no flywheel provaram o sucesso e os problemas foram resolvidos.

#### **4.2.6.4.2. Inversor**

Ao dimensionar o inversor, a moBiel decidiu optar por 1MW uma vez que a diferença de preço foi baixa em comparação com as unidades de 500 kW. Como resultado, os picos mais elevados de veículos previstos para o futuro vão

conseguir ser adaptados. A fim de testar a potência máxima dos sistemas de inversão de 1 MW, várias sessões frenagem foram feitas na vizinhança do inversor.

**Figura 13 - Vista dos picos de potência da subestação de Oetkerhalle, medidos em 07/03/2013**



**Tabela 15 - Dados técnicos do inversor da INGETEAM**

### Technical data of the INGETEAM inverter

- Technology: IGBT
- Voltage range: 400-1000 VDC
- Maximum power: 1MW
- Feedback current : 680AAC
- Efficiency rate: 98%
- Weight: 3.6 tons
- Noise : <65dB(A)

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

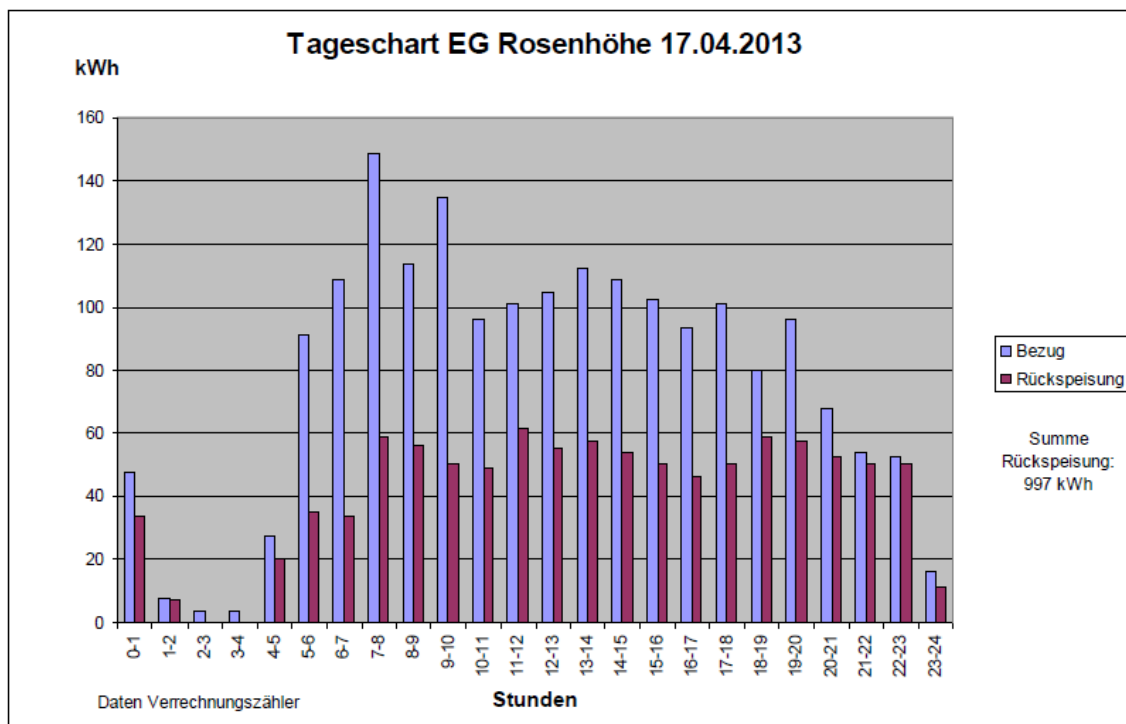
Ao selecionar os componentes do inversor, um transformador de baixa perda chamou sua atenção. Um sistema de ventilação mecânica foi instalado, a fim de conduzir o calor residual do inversor para fora do prédio da subestação e evitar o superaquecimento do equipamento.

Ao planejar a instalação de um sistema de inversor, os pedidos estabelecidos nas condições técnicas de conexão (Technische Anschlussbedingungen, TAB) têm de ser respeitados ao ligar um sistema de geração de energia à rede de média tensão. Então, um retransmissor de proteção tem que ser adaptado para a desconexão de tensões altas, e tem que ser provado ainda que o inversor desligará em caso de falha de energia.

Um analisador de rede é usado para verificar o valor da energia recuperada e se o sistema está em conformidade com os limites em termos de harmônicos.

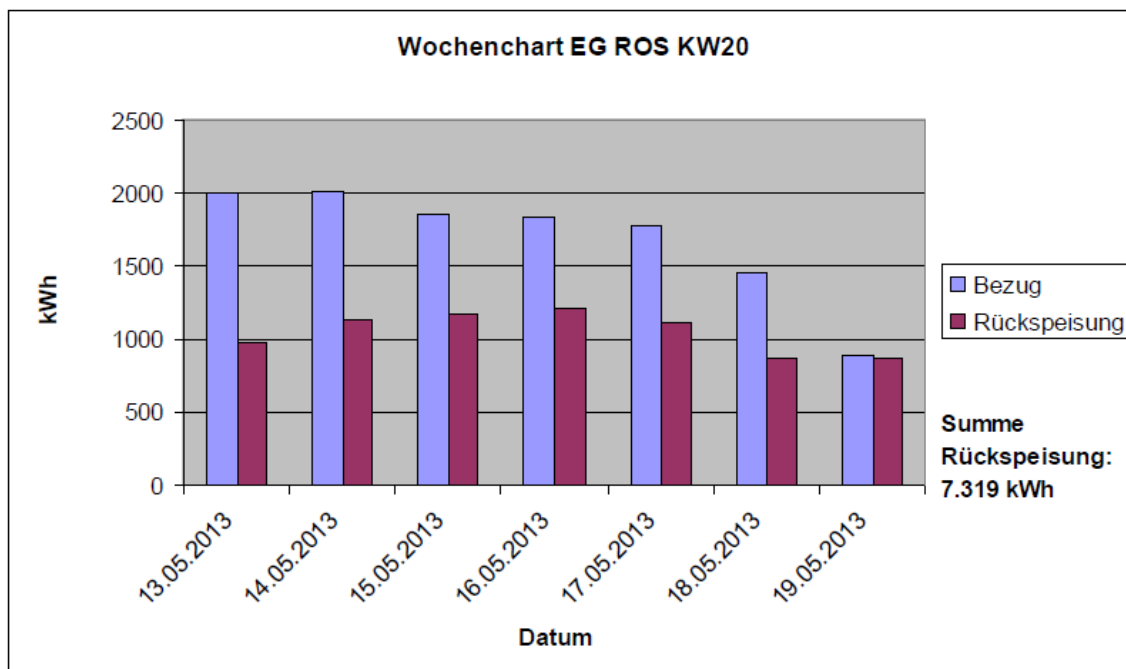
Para os sistemas de inversão, o medidor de carga do fornecedor local de energia tem de ser substituído por um medidor do tipo 4quadrant. Os resultados destes medidores calibrados usados para análise interna são relatados e controlados por leitura remota dos inversores.

**Figura 14 - Resultados de fornecimento e realimentação de energia ao longo do dia; Medidos em 17/04/2013**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

**Figura 15 - Resultados de fornecimento e realimentação de energia ao longo da semana**



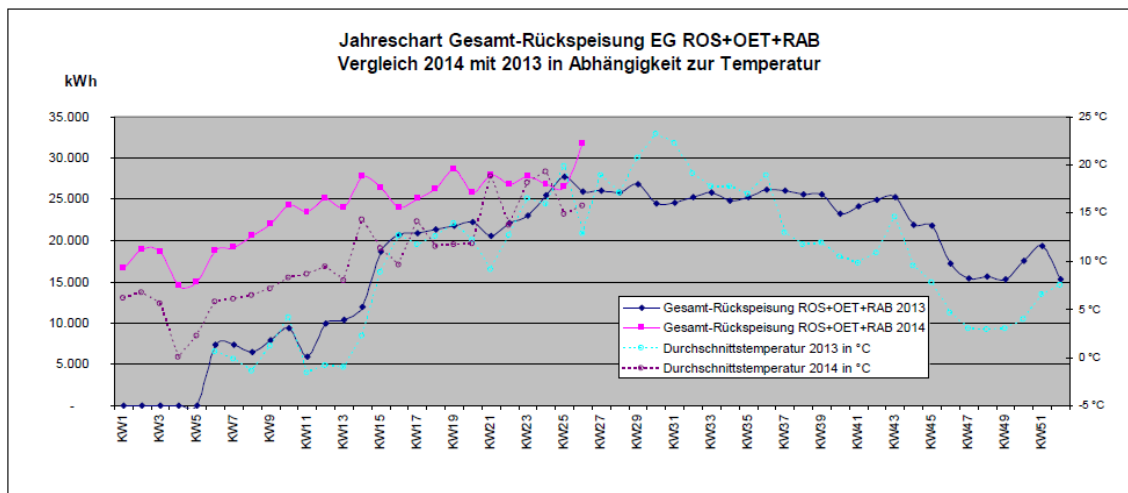
Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

#### 4.2.7. Resultados

Os resultados de recuperação de energia dos diferentes sistemas têm sido recolhidos continuamente.

Os valores semanais de recuperação de energia são dados na Figura a seguir e correlacionam-se com a temperatura média. A moBiel tem notado uma forte influência da temperatura no exterior nos seus resultados. Durante o inverno, as economias de energia são muito mais baixas, devido ao fato de o veículo utilizar uma parte da energia recuperada diretamente para as necessidades de aquecimento. Isso acontece também durante os meses de verão, mas em menor quantidade, para as necessidades de arrefecimento(ar condicionado). A moBiel também está analisando como o flutuante número de passageiros está impactando os resultados. A figura mostra também que os resultados do primeiro semestre de 2014 são muito melhores que os do semestre anterior. Isto é devido ao fato de que todos os sistemas foram aperfeiçoados para otimizar a recuperação de energia.

**Figura 16 - Visão geral dos resultados da realimentação de energia de todas subestações com sistema de recuperação de energia em correlação com a temperatura média**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Uma profunda análise dos resultados mostrou que a eficiência global do inversor é de 98% em comparação com os 85% do flywheel. Essa menor eficiência do sistema de armazenamento de energia resulta das perdas nos níveis de motor, no gerador e por atrito do flywheel.

No entanto, os resultados anuais do flywheel excederam as expectativas baseadas no estudo da rede. Os resultados de ambos os inversores estão em linha com as expectativas. Todos os sistemas estão atualmente sendo aperfeiçoados para otimizar a economia de energia. A redução global de consumo de energia equivale a cerca de 6% da energia de tração dos trens. O tempo de retorno é de 10 anos , sem financiamento.

**Tabela 16 - Visão geral dos resultados baseado em medições reais e simulações**

Type (location)	Calculation for 2014 based on real measurements	Expectations based on simulations
Flywheel system (Rabenhof)	360,000 kWh	220,000 kWh
Inverter (Oetkerhalle)	320,000 kWh	346,000 kWh
Inverter (Rosenhöhe)	350,000 kWh	295,000 kWh
Inverter (Universität)	70,000 kWh	50,000 kWh
TOTAL	1,100,000 kWh	911,000 kWh

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Custos de manutenção:

A moBiel espera custos de manutenção de cerca de 3.525 € / ano para cada sistema de flywheel e de cerca de 2.300 € / ano para os inversores.

**Tabela 17 - Visão geral de custos e economia de energia**

Investment costs (€)	1,1 Mio Euro
Energy savings (%)	7%
Energy savings (kWh/year)	1,1 Mio kWh/a
Annual CO <sub>2</sub> savings (TCO <sub>2</sub> ) <sup>4</sup>	570 TCO <sub>2</sub>
Payback time (years)	5 years with funding 10 years without funding

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Consumo adicional de subestações vizinhas:

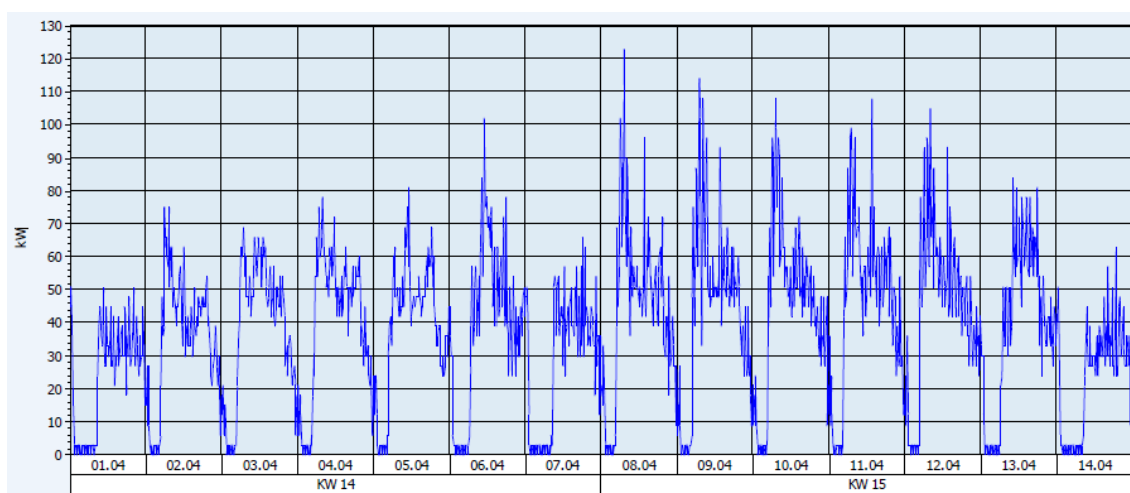
Ao determinar os resultados da economia de energia, o consumo das subestações vizinhas tem que ser considerado. Este consumo deve ser subtraído dos valores de recuperação de energia. O consumo total de todas as subestações vizinhas foi monitorado em diferentes épocas do ano, durante um dia completo em cada época. Os valores foram comparados com os valores quando os sistemas de recuperação de energia de frenagem foram desligados.



A moBiel chegou à conclusão de que o consumo adicional de outras subestações era relativamente baixo. Este consumo adicional provém do fato de que um pouco da energia da rede é recuperada e não pode ser utilizados por outros veículos mais.

Além das economias geradas, a redução da energia nos picos permitiram uma vantagem adicional na determinação do preço da energia.

**Figura 17 - Redução dos picos de energia, sistema de armazenamento de energia ligado na semana 14 do calendário (esquerda), e desligado na semana 15 do calendário (direita)**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Novo inversor na subestação da Universidade:

Após dispor dos resultados da fase piloto, um terceiro inversor foi adquirido e instalado na subestação da Universidade, no final da linha 4. Depois de completada a extensão da linha, é esperada uma recuperação de energia de frenagem anual de 310.000 kWh. Os resultados até agora são acima das expectativas. As instalações localizadas nas extremidades da rede produziram melhores resultados do que aquelas situadas no centro da cidade. Isto pode ser explicado pelo fato de que a receptividade da linha na região do centro é melhor, devido à maior densidade de veículos.

Conclusão:

A moBiel espera que em 2014 a economia de energia seja de cerca de 1,1 GWh, o que corresponde a 6,8% da energia global de tração de trem elétrico e uma redução de cerca de 570 toneladas de CO2 emitido. Os sistemas se desempenharam muito bem e poucas falhas ocorreram. A moBiel está muito satisfeita com o conceito de recuperação de energia de frenagem e espera que outras empresas decidam investir nesse campo.

### **4.3. RET - Rotterdam**

#### **4.3.1. Contexto**

A RET é a empresa que oferece serviços de transporte público na cidade de Rotterdam e sua periferia, operando cinco linhas de metro, 10 linhas de trens elétricos, 58 linhas de ônibus e um serviço de balsa. A RET é o principal operador na área e também o responsável pela infraestrutura ferroviária. Quase 600.000 pessoas usam serviços de transporte público da RET todos os dias. Rotterdam é a segunda maior cidade da Holanda e o maior porto marítimo na Europa. A população da cidade era de cerca de 615.000 habitantes em 2012.

#### **4.3.2. Experiência Passada**

No passado, a RET realizou um teste com um flywheel a bordo de um trem elétrico. Os resultados desse teste não foram muito promissores quando um flywheel se soltou, resultando em danos relevantes. Felizmente isso aconteceu quando o trem estava em uma oficina e não enquanto estava em serviço, mas foi o suficiente para a RET considerar o equipamento perigoso.

A RET também testou um sistema de armazenamento a base de supercapacitores ao longo da sua rede de trens elétricos. O sistema, ainda em execução, obteve economias abaixo das expectativas ao ser implantado, além de não ser muito confiável, tendo que ser regularmente desligado.

Hoje quase não existem falhas e as economias estão dentro das expectativas.

Outro problema é o ruído produzido pelo sistema. A instalação foi construída em um container especial para reduzir o nível de ruído no meio ambiente.

Durante seu funcionamento, foram medidos os níveis de ruído gerado, como mostrado a seguir.

**Tabela 18 - Resultados das medições de ruídos do sistema de supercapacitores, RET**

Distance	A SES off, ventilation off	B SES off, ventilation on	C SES active, ventilation on
0 mtr.(inside the container)	48 dB(A)	72 dB(A)	75 dB(A)
1 mtr	58 dB(A)	64 dB(A)	66 dB(A)
10 mtr	56 dB(A)	58 dB(A)	59 dB(A)

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

O ruído no interior do container era muito elevado mas o amortecimento das paredes era significativo. Felizmente, o container está localizado em uma área de indústria de eletricidade, o que significa que não existem pessoas que vivem na área ao redor. Para áreas habitadas mais densas o barulho provavelmente será ainda demasiadamente elevado, além de consistir em algumas frequências altas de som, considerado bem irritante.

#### **4.3.3. Topologia das linhas e headways**

A rede de metro em Rotterdam é composta por 5 linhas com um comprimento total de 78 km. O número médio de trens na linha D é dado a seguir.

Figura 18 - Planta da rede de metro RET composta por 5 linhas



Tabela 19 - Número médio de trens na linha D do metro RET, RET



	<u>Rotterdam CS – Slinge (7 km)</u>	<u>Slinge – Akkers (14 km)</u>
07:00h – 09:00h	16 – 18	12
09:00h – 16:00h	12	6
16:00h – 20:00h	16 - 18	12

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

#### 4.3.4. Veículos

A RET tem dois tipos de veículos na sua rede de metro e ambos são capazes de recuperar a energia de frenagem e enviá-la de volta à rede numa tensão de 750V DC para ser usada por outros veículos.

**Tabela 20 - Visão geral dos veículos da linha D da RET**

	Type SG2	Type RSG3
		
Weight	44.3 t	65 t
Length	30 m	45 m
Acceleration	max 1.0 m/s <sup>2</sup>	max 1.0 m/s <sup>2</sup>
Braking	max -1.5 m/s <sup>2</sup>	max -1.5 m/s <sup>2</sup>
Braking power	max 1200 kW	max 1800 kW
Trains on D-Line	2, 3 or 4 cars coupled	1 or 2 cars coupled

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

#### 4.3.5. Rede elétrica

40 subestações alimentam a rede elétrica. A tração da rede de Metro de Rotterdam é idêntica ao de Bruxelas, consistindo em diversos segmentos, que são eletricamente ligados por meio das subestações. A tensão nominal é 750VDC com um máximo de 900VDC.

A alimentação das subestações é diferente: cada subestação está ligada a uma rede de 10 kV ou 23 kV que é posse da RET. Esta rede está ligada com o fornecedor de energia em alguns locais. A figura abaixo mostra a configuração de 10 kV da linha D. Os sistemas de recuperação de energia têm sido estudados para a linha D, entre a Estação Central de Rotterdam e da estação De Akkers, no final da linha.

**Tabela 21 - Características da rede elétrica do metrô, RET**

<b>Medium Voltage network</b>	10 kV
<b>Nominal Traction voltage</b>	750 Vdc
<b>Zero Load Traction voltage</b>	850 Vdc
<b>Maximum Traction voltage when braking</b>	900 Vdc
<b>Rated power of substations</b>	most 2 x 1440 kVA. Some higher.
<b>Average distance between substations</b>	appr. 2.0 km
<b>Feeding system</b>	3rd rail

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

#### **4.3.6. Tomando decisões**

##### **4.3.6.1. Analise**

A RET considera a recuperação de energia por frenagem como uma grande oportunidade para reduzir a energia utilizada pelo seu sistema de metrô. Um sistema de armazenamento com base em supercapacitores foi aplicado ao longo da rede de trens elétricos no passado, mas os resultados foram abaixo das expectativas. A instalação também foi muito barulhenta e teve de ser enclausurada em um container. A RET também tem algumas dúvidas quanto os flywheels. Ela passou por uma série de falhas com um sistema de flywheel a bordo de um bonde: o flywheel trabalhou com folga e destruiu a instalação. A empresa fez uma avaliação da situação, tendo em conta o histórico de outros sistemas de recuperação de energia, investimentos e custos operacionais, requisitos de espaço e os riscos de cada tecnologia. A subestação reversível foi vista como a melhor opção para a rede de metrô na área de Rotterdam.

Então, a RET decidiu investir em dois inversores, onde não era necessário armazenamento e a energia pôde ser utilizada diretamente na rede de 10 kV. Para determinar a melhor localização para estes inversores na rede, uma simulação foi feita em diferentes horários. Isto levou conclusão de colocá-los em duas linhas diferentes.

**Tabela 22 - Business case para o sistema de recuperação de energia de frenagem, RET**

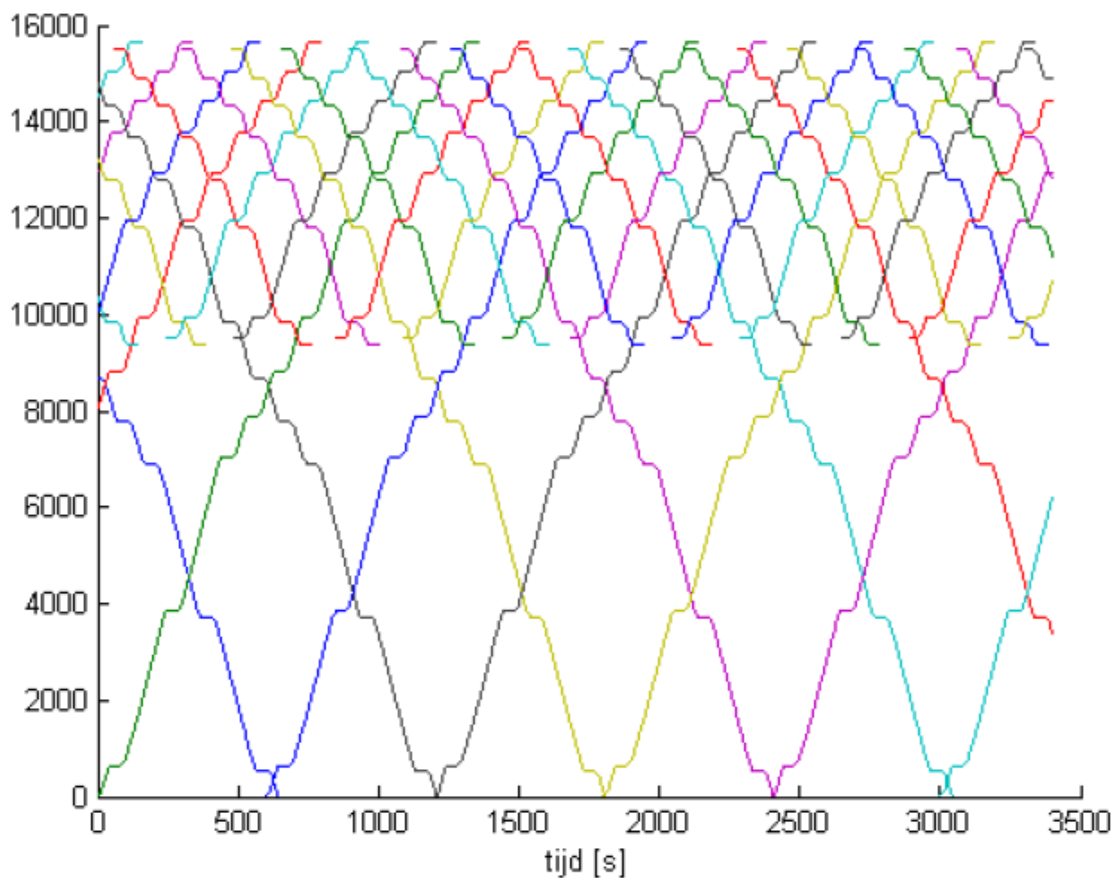
Investment	€ 477.894	
T2K contribution	€ 219.960	
Contribution RET	€ 257.934	
Yearly costs	€ 2.972	
Savings / year	€ 54.780	
Interest rate	15%	
Lifetime [Years]	10	
<b>Year</b>	<b>Net present Value</b>	<b>Cumulated</b>
0	-€ 257.934	-€ 257.934
1	€ 45.050	-€ 212.884
2	€ 39.174	-€ 173.709
3	€ 34.065	-€ 139.645
4	€ 29.621	-€ 110.023
5	€ 25.758	-€ 84.266
6	€ 22.398	-€ 61.868
7	€ 19.477	-€ 42.391
8	€ 16.936	-€ 25.455
9	€ 14.727	-€ 10.728
10	€ 12.806	€ 2.078
<b>NPV (10 jr/15%)</b>	<b>€ 2.078</b>	
<b>ROI</b>	<b>5,0 years</b>	

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

#### 4.3.6.2. Simulação

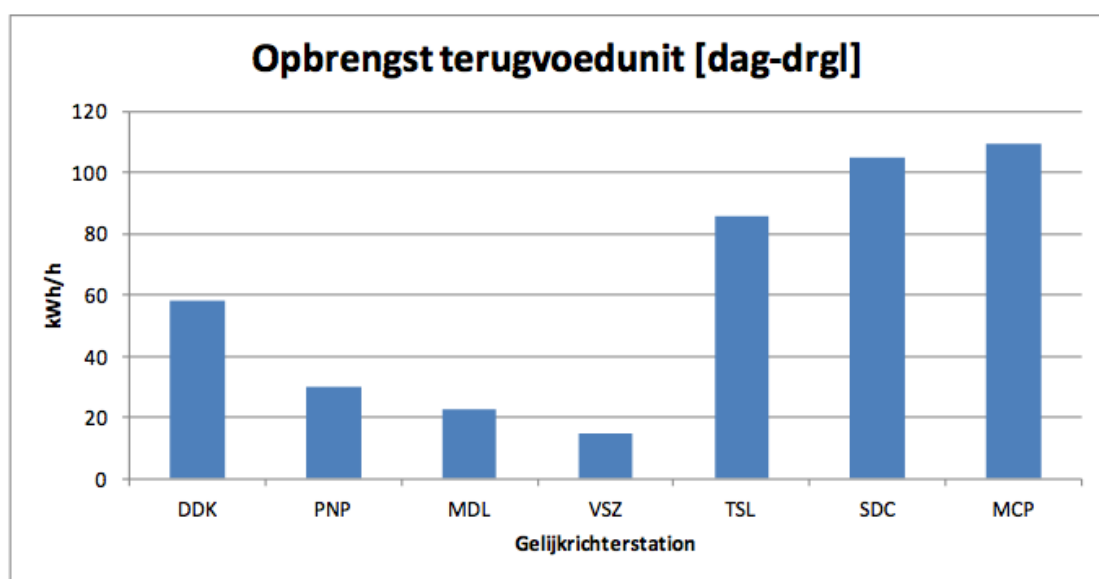
A RET pediu a uma consultoria, MOVARES, para desenvolver um software de simulação para avaliar o potencial de economia na linha D e encontrar as melhores subestações para a instalação dos sistemas. Tal software permitiu selecionar os dois melhores locais para a implementação de um inversor tanto para a linha Benelux quanto para a linha Erasmus.

**Figura 19 - Visão da simulação do "timetable" da linha C de Benelux, Movares**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

**Figura 20 - Simulação de economia de energia semanal da linha de Benelux, Movares**

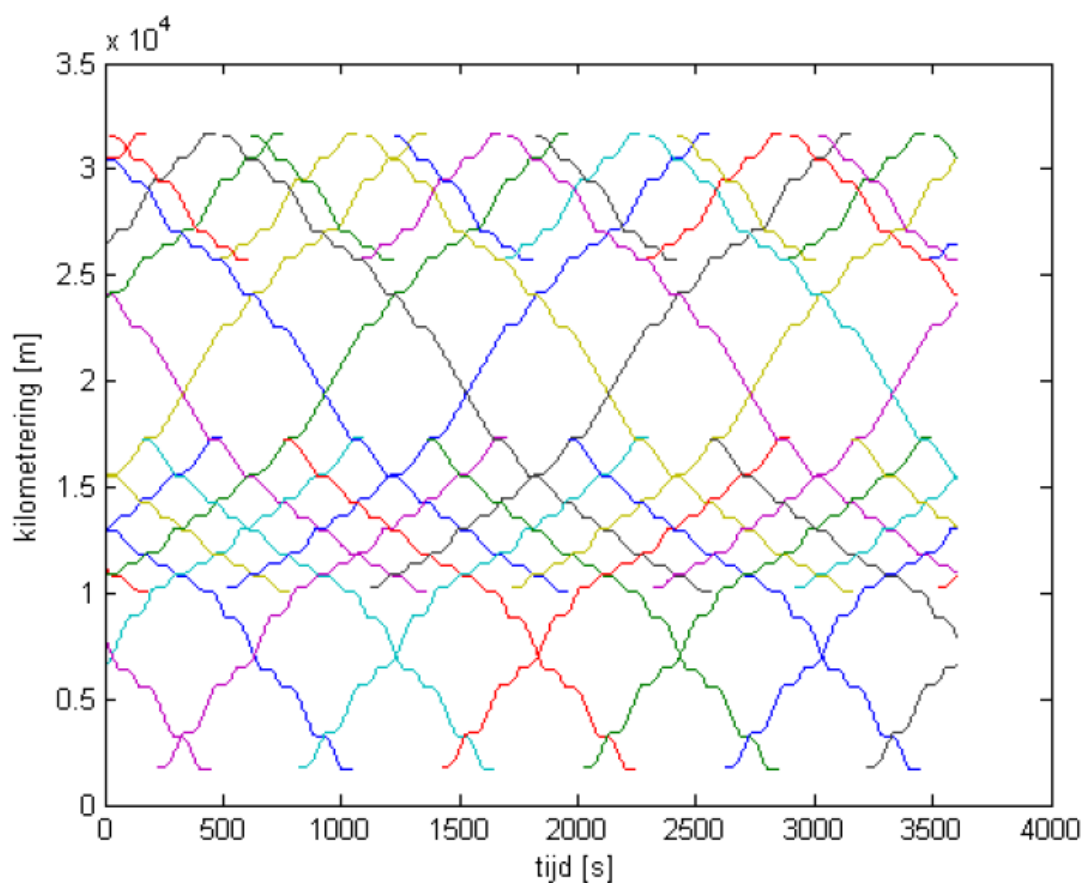


Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)



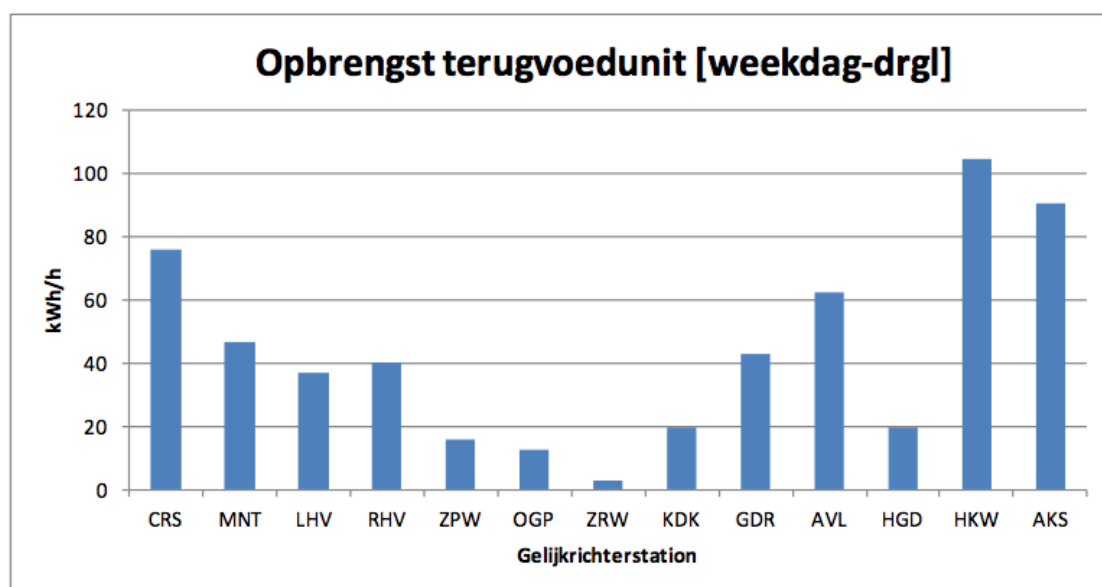
Embora a subestação de Marconiplein (MCP) tenha tido um pouco maior de economia, a RET escolheu a Schiedam Centrum (SDC) para a localização do inversor devido a razões operacionais, com economias estimadas em 663 MWh /ano.

**Figura 21 - Visão da simulação do "timetable" da linha D de Erasmus, Movares**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

**Figura 22 - Simulação de economia de energia semanal da linha de Erasmus, Movares**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Por ter a maior economia, a RET escolheu a subestação Hekelingsweg (HKW) para a localização do segundo inversor com economias estimadas em 560 MWh /ano.

#### **4.3.6.3. Licitação**

O processo de licitação foi realizado em duas etapas: a primeira foi uma seleção a partir de uma pré-qualificação dos fornecedores. Os fornecedores tiveram de cumprir alguns requisitos primordiais à RET

A segunda etapa foi um processo de licitação com os fornecedores pré-qualificados. Primeiramente, eles tiveram que fazer uma oferta e uma descrição dos sistemas propostos e seu processo de instalação.

Depois, houve uma reunião com cada fornecedor sobre problemas ou questões que eles enfrentavam, já que a tecnologia era relativamente nova para eles, bem como para RET.

Após estas reuniões, os fornecedores foram convidados para fazer uma oferta final. Além dessa oferta final, a RET escolheu a melhor opção, revendo as ofertas através do seu sistema de avaliação padronizado, os custos de revisão,

de conformidade técnica, aspectos legais etc. A empresa IMTECH Traffic & Infra BV (Netherlands) foi a selecionada para instalar os dois inversores.

#### **4.3.6.4. Implementação**

Para determinar a melhor localização para estes inversores na rede, uma simulação foi feita em diferentes horários. Isso levou a conclusão de colocá-los em duas subestações existentes: uma em Schiedam Centrum e outra em Hekelingseweg, como já dito.

**Tabela 23 - Dados técnicos dos inversores utilizados**

#### Technical data of the inverters

- Technology: IGBT
- Voltage range: 400-1000 V DC
- Maximum power: 1MW
- Feedback current : 58A AC
- Efficiency rate: 98%
- Weight: 3.6 tons
- Noise : <65dB(A)

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

As instalações dos dois inversores foram terminadas em março de 2014, mas os sistemas não estão ainda trabalhando idealmente. As novas instalações precisam ser adaptadas ao equipamento elétrico da RET existente. Durante o primeiro teste, a RET encontrou avarias com as instalações existentes e um transformador foi queimado na estação de Schiedam Centrum. Além disso, o transformador na Hekelingseweg foi danificado devido a um curto-circuito no inversor. Para prevenir e corrigir isso, RET e IMTECH estão trabalhando em melhorias do equipamento.

#### **4.3.7. Resultados**

Já que os sistemas ainda não estão funcionando, não há ainda resultados.

#### **4.4. TfGM**

#### **4.4.1. Contexto**

A TfGM (Transport for Greater Manchester), é a organização responsável pela política de transportes locais em uma área habitada por cerca de 2,5 milhões de pessoas. A A TfGM é responsável por fornecer as instalações e infraestrutura aos eficientes sistemas de transporte e por permitir seus habitantes fazer escolhas sensatas a respeito das opções de transporte. Ela gerencia 22 estações de ônibus ao redor da Grande Manchester, 12.500 pontos de ônibus, mais de 4.000 abrigos de ônibus, 76 paradas de trens elétricos e 77 km de linhas dos mesmos. Ela não tem experiência no passado no assunto.

#### **4.4.2. Experiência passada**

A TfGM não tem experiências no passado no assunto.

#### **4.4.3. Topologia das linhas e headways**

A rede da Metrolink se desenvolveu principalmente de antigas linhas ferroviárias e, como resultado, é marcada por grandes espaçamentos médios de parada obtendo vários trechos onde a velocidade máxima de linha de 80 km/h é mantida por um período significativo. No entanto outras partes do sistema têm paradas muito mais próximas, principalmente o trecho próximo ao centro da cidade, onde as velocidades médias são bem mais baixas.

No quesito relevo, as linhas ao norte da cidade são montanhosas enquanto as para o sul são mais planas. O trecho mais íngreme no sistema tem 6,5% de inclinação. As linhas montanhosas tem gradientes longos, mas não tão íngremes, como seria de esperar dada a sua origem ferroviárias.

O sistema de Manchester geralmente opera com doze minutos de headway. No entanto, o padrão de serviços operado é tal que a maioria das linhas são servidas por duas vias para dar um headway de seis minutos durante o pico, reduzindo a doze minutos fora dessas horas. Ainda há uma redução para quinze minutos no início da manhã e no fim da noite.

#### **4.4.4. Veículos**

A frota de trens elétricos da Metrolink sempre teve capacidade de regeneração. A única novidade é que com os novos veículos, existe a capacidade de regenerar energia a velocidades mais baixas, já que não há necessidade de mesclar com freio de ar como nos veículos mais velhos. Todos os trens elétricos têm aproximadamente a mesma capacidade de transporte de passageiros, mas os novos M5000 são aproximadamente 10 toneladas mais leve, o que reduz tanto a energia consumida quanto a regenerada.

#### **4.4.5. Rede elétrica**

Quando a expansão do sistema estiver pronta, 45 subestações irão fornecer a alimentação elétrica de tração para a Metrolink. Cada uma delas terá a sua própria conexão, independente do fornecedor de energia e não há rede de energia interna.

A natureza da rede é radial partindo do centro da cidade de Manchester. Assim, não há possibilidade de ligar eletricamente as diferentes vias fora da área do centro. No centro, as velocidades são baixas devido a um ambiente compartilhado com outros veículos (incluindo pedestres), levando a pouca energia a se recuperar.

A rede de trens elétricos tem tensão nominal de 750V de corrente contínua com a regeneração permitida até um máximo de 900V de corrente contínua.

#### **4.4.6. Tomando decisões**

##### **4.4.6.1. Analise**

A TfGM propôs instalar um sistema de armazenamento de energia em solo (ESS), o que permitiria o uso da energia regenerada posteriormente para outro veículo quando passasse por acelerações em trechos relevantes. O uso da ESS deve, portanto, maximizar a utilização da energia regenerada e reduzir os gastos globais no fornecimento elétrico ajudando assim também a minimizar a geração de CO<sub>2</sub>.

#### 4.4.6.2. Simulação

Mott MacDonald tinha desenvolvido previamente um modelo de simulação do sistema de fornecimento de energia da Metrolink como parte de uma investigação anterior que foi validado pela TfGM. Este software, conhecido como TRAIN, foi então reformulado levando em conta as mudanças no sistema de fornecimento de energia e a necessidade de avaliar o desempenho dos sistemas de armazenamento. Para a avaliação inicial, foram definidos dois períodos de serviço: fora e dentro do pico

A simulação analisou o potencial de poupança para um sistema de armazenamento de energia baseado em supercapacitores (ESS – “Energy Storage System”). Para avaliar o desempenho do ESS, foram realizadas as seguintes simulações: um modelo de serviço de pico de 2 horas e outro de 2 horas fora de pico.

Todas as simulações foram de condições operacionais normais, ou seja, com todas as subestações operando normalmente e todos os serviços operando com os headways programados. Os resultados da análise são baseados no uso da Siemens Sitras Sess. Outros dispositivos (possivelmente usando uma tecnologia alternativa) podem produzir resultados diferentes.

**Tabela 24 - Resultados da simulação dos sistemas de armazenamento de energia baseado em supercapacitores**

ESD	Time Period	Likely Energy Saved In			
		1 hour (kWh)	1 week (kWh)	1 year (kWh)	15 years (kWh)
Hagside	Peak	29.3	2,110	109,720	1,645,800
	Off-Peak	12.4	645	33,540	503,100
	Subtotal	N/A	2,755	143,260	2,148,900
Brooklands	Peak	36.4	2,620	136,240	2,043,600
	Off-Peak	12.4	645	33,540	503,100
	Subtotal	N/A	3,265	169,780	2,546,700
Total Energy Saved			6,020	313,040	4,695,600

#### 4.4.7. Resultados

Com base nas informações recebidas de diferentes fornecedores, a TfGM concluiu que o negócio não era rentável devido a um longo período de retorno,

apesar das economias de energia serem significativas. Como resultado, a TfGM não investiu em um sistema de recuperação de energia.

#### **4.5. Empresas e produtos**

##### **4.5.1. Alstom**

A Alstom concebeu um produto intitulado de HESOP <sup>TM</sup> atendendo às preocupações econômicas e ambientais dos maiores operadores da União Europeia. Consiste em uma subestação com uma fonte de alimentação avançada que foi projetada para oferecer uma ótima eficiência energética, com custos de infraestrutura reduzidos, para as redes de transporte ferroviário. O HESOP <sup>TM</sup> é novidade por possuir um conversor com regulação dinâmica ,ou seja, otimiza a potência necessária para tração e consegue captar mais de 99% da energia recuperável durante a frenagem sem cessar a troca natural de energia entre os trens.

O HESOP <sup>TM</sup> é inovador por que é a única solução que oferece funções tanto de tração quanto de recuperação dentro do mesmo equipamento.

O HESOP <sup>TM</sup> traz benefícios desde a construção até a operação e manutenção. Ele permite aumentar a distância entre as subestações. Isso faz com que o número de subestações seja menor (de 5 a 7 normalmente substituído por 4 a 6 estações HESOP). Isso resulta em menos custo obviamente.

A energia recuperada pode ser devolvida na rede ou então reutilizada através de outros equipamentos como elevadores, escadas rolantes, ventiladores, iluminação, etc., podendo chegar a até 40% de economia de energia de tração.

Essa subestação garante alta qualidade da energia obtida evitando multas e permitindo preços mais baratos de energia do fornecedor. Além disso, a energia excedente pode ser facilmente vendida.

O HESOP <sup>TM</sup> limita a dissipação de calor, diminuindo a quantidade de ventilação e arrefecimento nos túneis e estações. O peso do trem é ainda reduzido, gerando mais economia de energia ainda.

Ele fornece tensões de 600V a 1.500V DC para metros, trens elétricos e para a rede.

O HESOP <sup>TM</sup> já está em operação na Paris Tramway T1 desde julho de 2011 e está atualmente em fase de comissionamento na London Underground's Victoria Line. Outras implementações estão nos trens elétricos e metros de Milão e no Riyadh Metro na Arábia Saudita.

Em conjunto com a ATM (Azienda Trasporti Milanesi) - o operador de Metro de Milão - a Alstom iniciou o desenvolvimento de uma nova versão do produtor para operar com 1.500 V para linhas de metro e comboios suburbanos que consomem muita energia. Esse projeto foi selecionado pelo Programa LIFE + da Comissão Europeia, cujo objetivo é promover ações ambientalmente amigáveis. O seu desenvolvimento é 50% financiado pela União Europeia.

#### **4.5.2. INGETEAM**

A INGETEAM é focada em soluções e sistemas que forneçam boa troca/utilização de energia em muitos setores. Seus sistemas e soluções são focados em melhorias que trazem benefícios diretos principalmente aos operadores, como custos de exploração, confiabilidade, disponibilidade, facilidade de manutenção e eficiência energética.

Em sistemas de corrente contínua, a energia cinética regenerada não pode ser utilizada para o melhor fim, uma vez que as subestações elétricas são unidirecionais, e então a utilização de energia é limitada aos casos em que há um outro veículo a se beneficiar dessa energia, dissipando a energia nas resistências de frenagem caso contrário. A INGEBER minimiza as limitações de retorno de energia, otimizando-a e tornando disponível para diferentes finalidades.

Antes da instalação do sistema deve ser feita uma análise da rede existente com o software desenvolvido pela Ingeteam, tendo em conta as características do sistema para ser bem instalado tanto do ponto de vista técnico como do ponto de vista econômico. O sistema da INGEBER desenvolvido pela



Ingeteam permite que todas as limitações associadas ao retorno de energia a partir serem superadas.

O sistema consiste de equipamentos de potência eletrônica instalados na subestação e conectados ao equipamento principal(transformador, retificador, etc.). O sistema monitora continuamente a catenária até detectar o momento em que existe energia de travagem de um veículo que sendo incapaz de ser utilizada por outro. Então, o sistema extrai a energia da catenária e a transforma de acordo com os parâmetros de qualidade da rede de alimentação para essa energia conseguir ser devolvida a rede.

#### **4.5.3. Movares**

A Movares BV do Grupo Movares é uma das principais empresas de consultoria e engenharia holandesas, prestando serviços a empresas de transportes públicos, autoridades locais e outros clientes. Ela foca em soluções para os problemas de capacidade, segurança e integração, fornecendo conselhos e designs inovadores para seus clientes. É formada por cinco escritórios na Holanda, incluindo uma sede em Utrecht.

Conhecida por suas soluções em energia de tração e compatibilidade eletromagnética, fornecem soluções para energias de 600V a 3000V de corrente contínua e também de 25kV com e sem transformadores.

É a fornecedora preferencial dos operadores de Rotterdam, Amsterdam, Haia e Utrecht devido a enorme experiência em simulações, especificações e suporte técnico.

Os principais componentes de uma subestação já existente são os transformadores de média tensão, retificadores e unidade de distribuição. A média tensão vem geralmente direto da rede pública ou por um cabo de distribuição de média tensão de propriedade da empresa operadora ou município. O sistema de energia de tração foi totalmente otimizado para abastecer todos os veículos da forma mais eficiente possível. Isso levou a uma corrente contínua o mais baixo possível para maximizar a tensão em cada automóvel e minimizar as perdas na catenária ou do terceiro trilho e minimizar a

tensão de contato entre as vias e o solo. Isso tem sido possível escolhendo uma alta tensão sem carga no retificador. Essas configurações diminuiram as chances da energia elétrica voltar para o gride, enquanto o metro ou trem elétrico está freando. O retificador é substituído por um modificador em subestações em que o equipamento que fornece o poder de tração foi recentemente construído. O modificador pode atuar como um retificador "padrão" ou como um retificador reverso ou inversor.

A Movares é capaz de simular a tensão sem carga mais rentável para o inversor, dependendo da localização das subestações, paradas e itinerário dos trens. A transição de uma fonte de alimentação existente com retificadores para uma alimentação com modificadores é mais complexa.

É importante que haja interação entre os componentes principais da subestação e que quando várias subestações partilharem o mesmo cabo de média tensão, uma ligação elétrica adicional deve ser criada entre as subestações paralelamente à catenária ou terceiro trilho.

Ao introduzir em um sistema de alimentação de energia de tração padrão, o mesmo pode ser implementado de três formas comumente usadas: a primeira opção é um inversor em paralelo aos retificadores já existentes, quando ambos estão em serviço. Um "inversor extra" paralelo ao retificador existente requer uma diminuição da tensão sem carga do retificador para permitir a recuperação da energia ao frear; A segunda opção é ou um retificador em ou um inversor. Ambos os componentes são colocados em paralelo, mas operam independentemente e em circunstâncias ideais. A desvantagem é que subestações padrões não suportam um retificador duplo e um inversor duplo, reduzindo a confiabilidade deste tipo de subestação; a terceira opção é a substituição do retificador por um modificador. Neste caso, os modificadores se alternam como retificadores de alimentação, como retificadores de recuperação ou como inversores. Se necessário, o nível da tensão média é levado em conta.

Uma simulação completa necessita da investigação de todos os requisitos: desempenho, automóveis, subestações e rede de média tensão. Todas estas

entradas são necessárias para estabelecer a seleção de um fornecimento rentável para os operadores.

#### **4.5.4. Adetel**

A Adetel é uma empresa especializada em concepção, industrialização e fabricação de produtos eletrônicos e softwares em ambientes agressivos. Adetel tem desenvolvido vários produtos diferentes no âmbito como o Neo Green e o Neo Stab– eficientes sistemas de armazenamento de energia.

## 5. TECNOLOGIAS DE REGENERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA FRENAGEM DE TRENS

### 5.1. Conceito de recuperação de energia da frenagem

Quando falamos a respeito de transporte público, automaticamente pensamos no transporte de uma grande densidade de passageiros. Para que isso se torne possível da forma mais eficiente, o mais indicado são os veículos elétricos de transporte em massa, tanto por questões financeiras quanto por questões ambientais e de ocupação espacial e territorial urbanas.

Por serem movidos por motores elétricos que funcionam normalmente em corrente contínua e possuem altíssimas massas, os veículos ferroviários de transporte público necessitam de um fornecimento energético característico, com propriedades muito diferentes dos outros equipamentos elétricos que utilizamos em nosso dia a dia. Para fornecer elevadas cargas e tensões, necessárias para dar início ao movimento desses veículos, a energia elétrica precisa de um tratamento especial, que ocorre em subestações energéticas localizadas ao longo de toda a linha em questão.

Nessas subestações podemos encontrar elementos como retificadores, para converter a corrente elétrica de alternada para contínua, geradores, transformadores e conversores, adaptando a energia elétrica provida do fornecedor local às condições de operação da linha e do tipo de veículo utilizado.

Como a ideia é que o fornecimento de energia elétrica não seja a bordo do veículo e esteja sempre disponível ao longo de toda a linha, temos duas opções principais de sistemas de alimentação dos veículos: as catenárias, que são vias elétricas aéreas, sendo conectadas aos veículos através de pantógrafos, geralmente usadas em sistemas ao ar livre, por questões de segurança, ou os terceiros trilhos, instalados em paralelo com os trilhos de tráfego, transmitindo a energia elétrica pelos trilhos de tráfego sempre que necessário, geralmente usados em linhas subterrâneas do metrô, onde o risco do contato com os passageiros é reduzido.

**Figura 23 - Bonde elétrico de Moscou**



**Figura 24 - Terceiro Trilho do metrô**





A maioria dos veículos ferroviários recentes têm a capacidade de frear eletricamente usando técnicas de frenagem regenerativa. Nesse caso, o motor elétrico pode funcionar como um mecanismo de recuperação da energia cinética do veículo e convertê-la em eletricidade. Nestes veículos, ao mesmo tempo uma pequena porção desta energia cinética pode ser reutilizada para mover veículos auxiliares, uma parte pode ser enviada de volta para a rede e, se houver sincronia de frenagem/desaceleração entre dois veículos que se cruzam, a energia pode ser recuperada por este veículo acelerando nas proximidades, o qual tirará vantagem desta transferência de energia.

Se não existir um sistema de recuperação energética e um veículo for freado eletricamente, a tensão na rede aumenta devido à energia excedente e esta energia extra tem de ser dissipada nas resistências de frenagem, o que resulta em um imenso desperdício energético, pois além de perder essa energia na forma de calor, ainda há a necessidade de ventilar e resfriar os túneis de tráfego e as estações. Diante dos avanços tecnológicos e dos padrões de infraestrutura e ambientais atuais, uma situação como essa é considerada inaceitável, pois os ganhos e benefícios no médio-longo prazo promovidos pela implementação dessas tecnologias regenerativas são experimentalmente comprovados e inquestionáveis, fazendo valer a pena o investimento inicial que será despendido.

Essas trocas de energia entre os veículos dependem de parâmetros tais como a densidade de tráfego, as distâncias entre as estações e as inclinações do trechos. Em uma rede de metrô, essas transferências geralmente equivalem a 20-30% do consumo total. No entanto, em muitas situações, a energia não pode ser recuperada na rede, porque nenhum veículo está acelerando exatamente no instante em que outro está freando. Isto representa uma oportunidade interessante para implementar tecnologias de recuperação de energia de frenagem já existentes e que serão objetos de estudo nesse relatório.

## **5.2. Tipos de sistemas**

Com o intuito de evitar perdas de energia e reduzir o consumo global, vários sistemas foram desenvolvidos e adequados das mais diversas maneiras aos

novos ou já existentes sistemas de transporte público elétrico. Ao promover uma economia significativa de energia através da regeneração da energia de frenagem, estes sistemas podem impactar fortemente nos custos operacionais ligados à preços da energia e a emissões substancialmente mais baixas de CO<sub>2</sub>, bem como outros poluentes nocivos emitidos, induzidos pela produção de eletricidade em centrais elétricas. Tecnologias de recuperação de energia de frenagem podem ser classificadas em três principais sistemas:

- Sistemas de armazenamento móveis: consistem em sistemas de armazenamento de energia a bordo, geralmente localizados no teto do veículo, sendo que o sistema trabalha somente para o veículo no qual está instalado. Quando a energia recuperada não pode ser utilizada por um outro veículo nas proximidades, a energia é enviada diretamente para o sistema de armazenamento colocado no veículo. A energia armazenada é usada então para alimentar o veículo quando ele acelera ou alimentar os seus dispositivos auxiliares (aquecimento, arrefecimento, iluminação, etc).

Em alguns casos, se a topografia local for favorável (plana ou pouco inclinada) e a distância entre estações for curta, é até mesmo possível a implementação de um sistema de transporte totalmente isento de catenárias ou terceiros trilhos, sendo que as baterias ou supercapacitores à bordo dos veículos fornecerão toda a tensão e carga necessária para dar movimento aos veículos, sendo recarregados a cada parada nas estações, onde devem ser instalados maquinários de conversão subterrâneos para adaptar a energia elétrica local ao carregamento das baterias e supercapacitores. Nesses casos, como uma bateria ou supercapacitor não pode ser completamente carregado durante o curto intervalo de tempo em que o veículo permanece parado em uma estação (ou ponto), normalmente há alguns em funcionamento (descarga) enquanto os outros, já descarregados, recebem cargas nas estações, até que estejam prontos para o uso, trocando de função com os outros que acabaram de ser descarregados por completo e que assumirão agora a posição da recarga nas estações, e assim sucessivamente.

Um número limitado de sistemas isentos de catenárias ou terceiros trilhos foram implementados no campo dos transportes públicos em todo o mundo, o que torna difícil para os operadores de transportes tomar decisões de investimento em tal tipo de tecnologia, devido à falta de experiência, de feedback, das incertezas a respeito do retorno do investimento e da vida útil desses sistemas. Os custos poderão diminuir quando este mercado se expandir, como um resultado de melhorias tecnológicas e uma redução nos custos dos materiais (especialmente no caso das baterias ou ultracapacitores).

Eventualmente, células fotovoltaicas podem ser acopladas nas laterais e no topo dos veículos, para que seja tirado proveito da ampla energia solar incidente sobre esses veículos que circulam ao ar livre.

**Figura 25 - Foto do Catenary Free 1 (Midland, Texas)**





**Figura 26 - Foto do Catenary Free 2 (Bordeaux, France)**



- Sistemas de armazenamento estacionários: consistem de um ou vários sistemas de armazenamento de energia colocados ao longo dos trilhos. Eles podem recuperar a energia a partir de qualquer veículo freando e podem acelerar qualquer veículo dentro da área de influência do sistema. Assim sendo, a energia fica neles armazenada e pode ser utilizada tanto para acelerar um veículo que esteja partindo de uma estação quanto para alimentar os outros equipamentos auxiliares das estações.

Esses tipos de sistemas são utilizados quando não é desejada a instalação de equipamentos auxiliares à bordo dos veículos, reduzindo assim seu peso excessivo e aumentando o espaço útil para os passageiros. Além disso, a segurança dos veículos aumenta, uma vez que não há componentes elétricos ou químicos à bordo que eventualmente podem estar sujeitos a falhas e causar acidentes, como explosões ou descargas elétricas indesejadas. É claro que atualmente já existem sistemas extremamente confiáveis, mas o pequeno número de casos de aplicação e a desconfiança da tecnologia desenvolvida por

causa de uma baixa quantia de feedbacks ainda cria um certo preconceito por esses sistemas a bordo.

- Sistemas "de volta para a rede" estacionários: a principal diferença dos sistemas anteriores é que esses sistemas não armazenam a energia recuperada. Em vez disso, a energia é enviada para a rede elétrica principal para ser utilizada por outros consumidores ou potencialmente vendida de volta para as distribuidoras de energia.

### 5.2.1. Comparação entre os sistemas

**Tabela 25 - Comparação de aplicações das tecnologias**

	Sistemas de armazenamento móveis	Sistemas de armazenamento estacionários	Sistemas "de volta para a rede" estacionários
Perdas nas catenárias e nos terceiros trilhos são reduzidas	X		
Elevada eficiência devido a menos transformações e perdas de armazenamento			X
A energia de frenagem recuperada pode suprir qualquer equipamento			X
Veículos podem operar sem catenárias ou terceiros trilhos em trechos curtos da linha	X		
Os sistemas e subsistemas podem ser instalados sem a necessidade de modificar os veículos		X	X
Boas restrições de segurança, como não ser a bordo do veículo		X	X
O aquecimento de túneis e estações pode ser evitado pela redução do calor produzido pelos resistores de frenagem	X	X	X
Estabilização de voltagens e oportunidades em instantes de pico	X	X	

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

## 5.3. Tipos de tecnologias já existentes

### 5.3.1. Baterias

As baterias armazenam energia através de reações eletroquímicas. São encontradas em uma ampla variedade de tipos de reações e compostos químicos, tamanhos e potência. A potência de funcionamento das baterias varia de modelo para modelo, sendo que a maioria não consegue gerar elevadas potências, pois são limitadas pelas reações químicas que realizam.

- Vantagens: dependendo do modelo, as baterias possuem a capacidade de armazenar elevadas quantidades de carga (elevadas densidades de carga). Podem ser confeccionadas em diversos tamanhos e tensões de trabalho distintas, conforme a necessidade da aplicação. Apresentam a grande vantagem da mobilidade, podendo em muitas das vezes estarem a bordo do veículo que estão movimentando.
- Desvantagens: como as baterias dependem do tipo de reação química que a caracteriza e do tempo que tal reação leva para ser realizada, potências inferiores são produzidas. Por sofrerem cargas e descargas com elevada frequência, sofrem um rápido desgaste, possuindo uma vida útil muito inferior se comparada às demais tecnologias de armazenamento e recuperação de energia. Seus constituintes podem ser nocivos à saúde e ao meio ambiente, sendo que uma disposição final adequada e controlada deve sempre ser feita.

### **5.3.2. Ultracapacitores**

Os Ultracapacitores são dispositivos eletroquímicos de armazenamento nos quais a energia é armazenada em um campo eletrostático com base em separação de cargas (uma concentração de elétrons na superfície de um material com elevada superfície específica). Não há a ocorrência de nenhuma reação química. Eles preenchem o vazio entre os capacitores convencionais e as baterias e podem proporcionar até 10 vezes mais potência que a maioria das baterias de mesmo tamanho.

Ultracapacitores possuem duas placas de metal revestidas com um material semelhante a uma esponja porosa, o carvão ativado. Estão imersas em um eletrólito feito de íons positivos e negativos dissolvidos num solvente. Uma placa revestida com carbono, o eletrodo, é positivo, e o outro é negativo. Durante a carga, os íons do eletrólito se acumulam sobre a superfície de cada uma dessas placas revestidas de carbono. Diferem dos capacitores convencionais por apresentarem áreas efetivas muito maiores e menores distâncias entre suas placas.

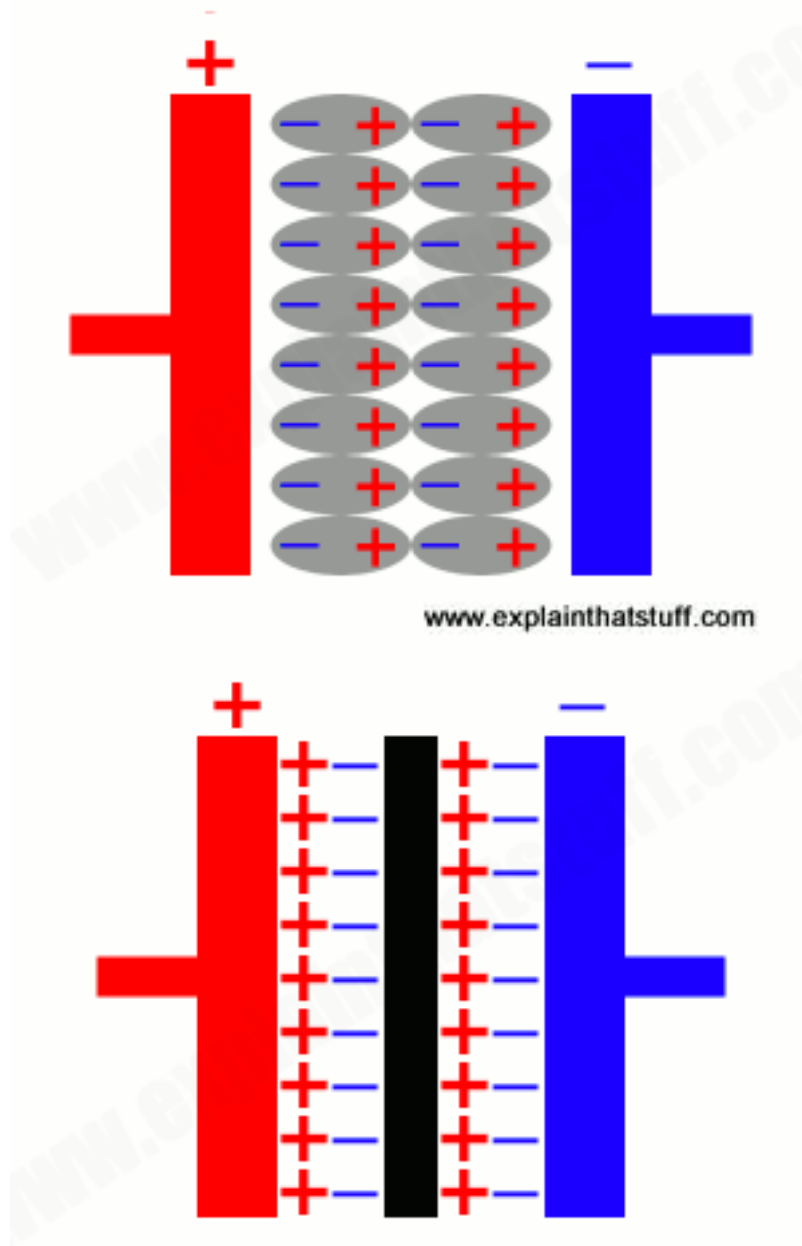
**Figura 27 - Foto com os Ultracapacitores 1**



**Figura 28 - Foto com os Ultracapacitores 2**



Figura 29 - Ilustração dos Ultracapacitores



- Vantagens: pelo fato de armazenarem energia em um campo elétrico ao invés de em uma reação química, podem sobreviver a milhares de ciclos de carga e de descarga antes de perderem sua funcionalidade, ao contrário do que acontece em uma bateria. Como armazenam energia sem reações químicas, podem carregar e descarregar muito mais rápido do que as baterias.



- Desvantagens: baixas densidades energéticas quando comparados a baterias. Células unitárias fornecem baixas voltagens; para obter-se maiores voltagens, devemos conectá-las em série. Quando 3 ou mais células são conectadas em série, é necessário o uso de um elemento balanceador de voltagem. Possuem uma elevada auto-descarga quando comparados às baterias, podendo não ser úteis para alguns tipos de aplicação.

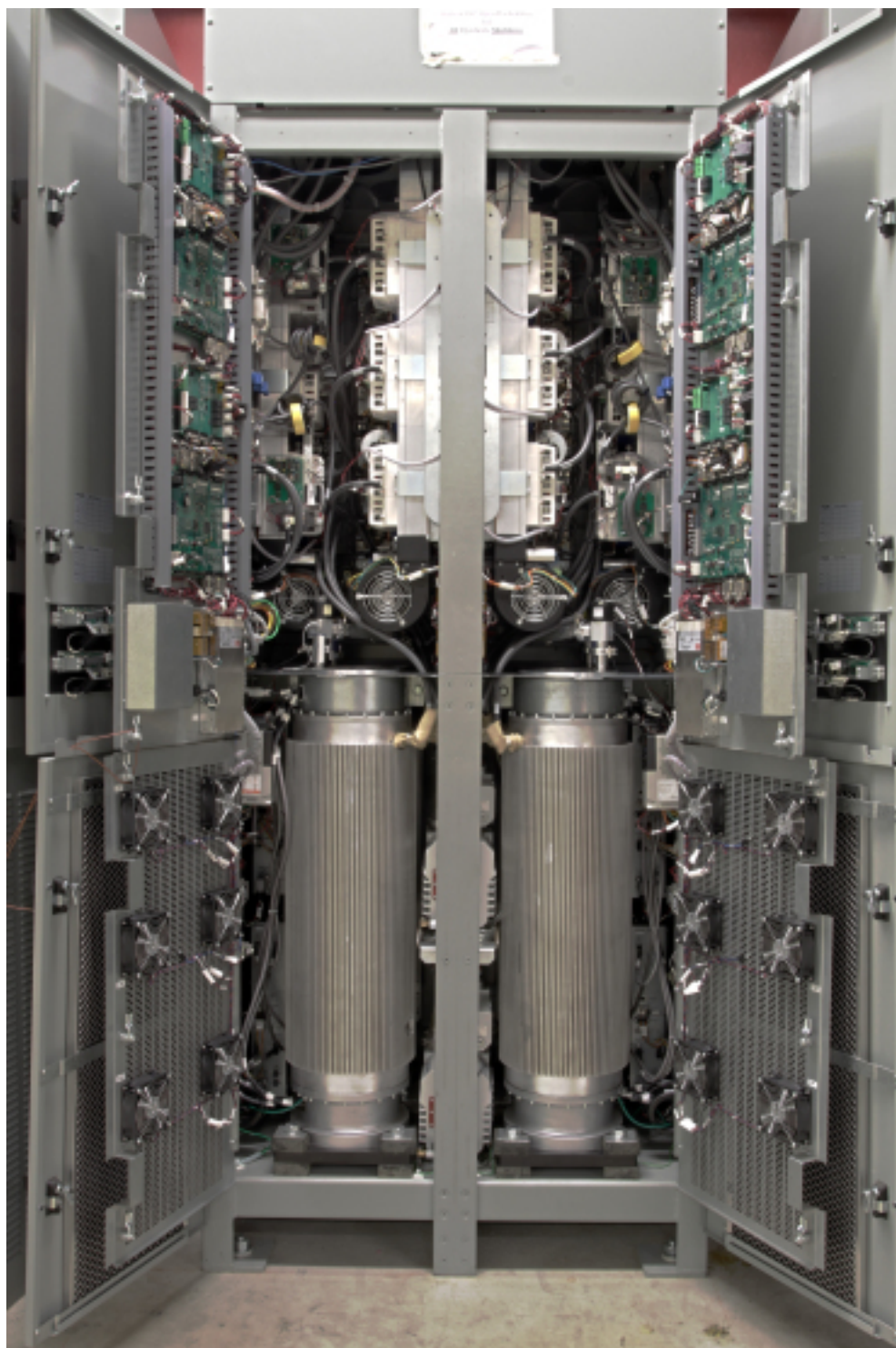
### 5.3.3. Flywheels

Os Flywheels são discos metálicos que giram em torno de um eixo, usados para armazenar energia mecanicamente na forma de energia cinética. As "flywheels" funcionam pela aceleração de um rotor a uma velocidade muito alta, mantendo a energia no sistema como energia rotacional. Possuem a capacidade de gerar elevados picos de energia, caso necessário, uma vez que dependem somente da frenagem do disco metálico para liberar a energia neles armazenada, o que pode ser feito em um baixo intervalo de tempo, ao contrário das pilhas, nas quais a potência do sistema dependerá da velocidade da reação química característica da pilha.

- Vantagens: "flywheels" são uma tecnologia relativamente simples, com muitos pontos de vantagem em comparação aos rivais tais como baterias recarregáveis. Em termos de custo inicial e manutenção contínua, apresentam custo extremamente inferior, duram cerca de 10 vezes mais, não são nocivas ao meio ambiente (não produzem emissões de dióxido de carbono e não contêm produtos químicos perigosos que causam poluição ou contaminação), trabalham em quase qualquer clima, e chegam rapidamente até a velocidade de trabalho (ao contrário das baterias, por exemplo, que podem levar várias horas para carregar). Elas também são extremamente eficientes (talvez 80% ou mais) e ocupam menos espaço do que as baterias ou outras formas de armazenamento de energia.
- Desvantagens: A maior desvantagem das "flywheels" é o peso do sistema, sendo uma das principais preocupações caso seja utilizado a

bordo de veículos. Outro problema é que um grande e pesado disco metálico girando dentro de um carro em movimento tenderá a agir como um giroscópio, resistindo a mudanças em sua direção e afetando potencialmente a movimentação do veículo. Uma dificuldade adicional são as enormes tensões e deformações originadas quando as "flywheels" giram a velocidades extremamente altas, que podem levá-las a quebrar e explodir em fragmentos. Isso limita o quão rápido elas podem girar e também a quantidade de energia que podem armazenar. Enquanto os modelos tradicionais são feitos de aço e giram ao ar aberto, os modelos mais modernos podem ser constituídos de compósitos de alto desempenho ou cerâmicas e serem selados no interior de recipientes, possibilitando maiores velocidades e acúmulos de energia sem comprometer a segurança.

Figura 30 - Foto do Flywheel 1





**Figura 31 - Foto do banco de Flywheels operando em série**



**Figura 32 - Foto do Flywheel 2**



#### **5.3.4. Subestações Reversíveis**

A maioria das subestações convencionais permitem somente um fluxo unidirecional de energia. Uma subestação reversível utiliza um inversor que permite a energia fluir em ambas as direções. Devido às elevadas perdas de transmissão, sistemas de corrente contínua não atingem altas taxas de recuperação, exceto em redes urbanas de grande densidade. A situação pode ser um pouco melhorada, tornando as subestações elétricas "reversíveis", o que significa que elas também podem operar no sentido inverso, alimentando a rede pública a partir da catenária ou dos terceiros trilhos. Se as subestações estão equipadas com inversores, a energia recuperada pode ser devolvida para a rede de abastecimento sempre que nenhum outro veículo estiver nas proximidades para usar a energia recuperada na frenagem.

Os sistemas das subestações reversíveis podem ser monitorados através de componentes eletrônicos para identificar a necessidade de utilizar a energia de frenagem para a aceleração de um outro trem ou para devolvê-la de volta para a rede. Esse sistema de medição possui também a capacidade de medir a porcentagem dessa energia total de frenagem que deverá ir para cada opção (aceleração ou de volta para a rede) e separá-la conforme a necessidade, otimizando a operação do sistema como um todo e proporcionando o maior grau de economia possível.

Figura 33 – Esquema de funcionamento do reversível: Fluxo de energia

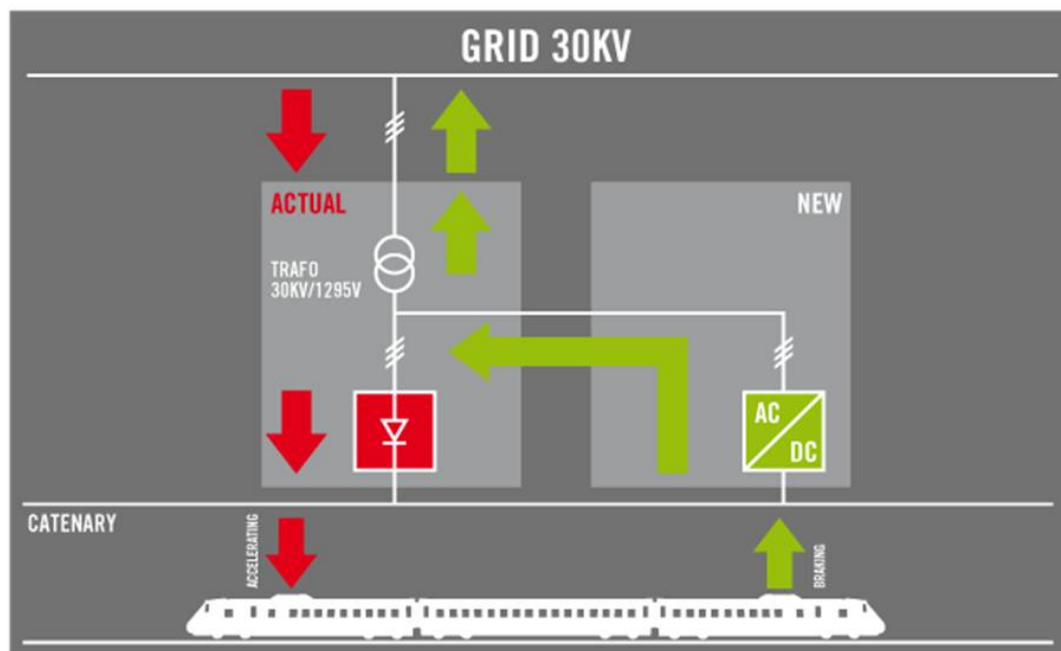


Figura 34 - Ilustração do funcionamento do reversível instalado



- Vantagens: pelo fato de a energia de frenagem de um veículo ser utilizada na aceleração de outro em tempo real, as taxas de economia são muito significantes, pois não há perdas devido ao armazenamento ou à

transmissão por longas distâncias. Se não houver um veículo acelerando, a energia recuperada pode ser devolvida à rede local, sendo vendida de volta para a operadora da rede elétrica, reduzindo assim as contas a serem pagas.

- Desvantagens: o sistema não terá bom desempenho em redes em que as frequências de passagem dos trens são baixas, apresentando alta eficiência apenas em redes urbanas densamente ocupadas. Longas distâncias entre estações consecutivas reduzem o desempenho do sistema, uma vez que favorecem a aleatoriedade entre encontros de veículos em sentidos contrários. O sistema apresentará uma baixa performance em trechos em aclive, uma vez que a energia cinética do veículo será convertida em energia gravitacional para permitir a sua ascensão, restando pouca energia para ser convertida em energia elétrica. Como as características de tensão e frequência da energia recuperada são iguais à da rede, essa energia só poderá ser devolvida para a rede ou reutilizada por um veículo acelerando, pois os demais equipamentos presentes nas estações e nos subsistemas da linha em questão necessitam de um tratamento específico desse tipo de energia para poderem utilizá-la, pois possuem diferentes tensões e frequências de operação.

**Tabela 26 - Quadro de Comparação das tecnologias**

	Supercapacitores	Baterias	"Flywheels"	Subestações Reversíveis
Possuem elevada densidade de carga		X		
Fornecem elevadas potências energéticas	X		X	X
Possuem rápidos ciclos de carga/descarga	X		X	
Não sofrem rápida auto-descarga		X		
Possuem elevada vida útil	X		X	X
Não ocupam espaço considerável			X	X
Possuem baixo custo de implementação			X	X
Possuem baixo custo de manutenção			X	X
Não necessitam de muita manutenção	X		X	X
Não originam forças e tensões mecânicas	X	X		X
Podem alimentar qualquer tipo de equipamento	X	X		X
Não há incertezas quanto à confiabilidade			X	X

Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

## 6. DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA MAIS PROMISSORA

Dependendo das características da linha onde se deseja implantar o sistema de recuperação energética, podemos optar por um ou por outro tipo de tecnologia, sendo que diversos fatores influenciam no desempenho dos diferentes sistemas e tecnologias existentes. Em certos casos, dependendo dos fatores econômicos, políticos e sociais locais, bem como da disposição do terreno e da maneira como as linhas já presentes foram implementadas, os custos e a complexidade da implementação dos sistemas de regeneração de energia de frenagem podem inviabilizar sua implementação.

Experimentalmente pode-se demonstrar que não é uma tarefa fácil comparar os diferentes tipos de tecnologias. Alguns tipos de sistemas podem ser descartados logo de início, pois se algum fator que o inviabilize esteja fortemente presente, dificilmente será possível implementá-lo devido aos elevados custos associados. Encontrar a tecnologia melhor adaptada e optar pela correta implementação requer uma aproximação muito complexa que leva muitos parâmetros em consideração, como por exemplo:

- tipo de alimentação: por catenárias ou por terceiros trilhos;
- as características da rede elétrica que alimenta a linha;
- o tipo e a idade do veículo que trafega na linha;
- o período de passagem dos veículos;
- a sinuosidade e a declividade da linha em seus diferentes trechos;
- a cultura e costumes dos indivíduos que utilizam o serviço;
- a demanda e o número de passageiros ao longo do dia em cada estação;
- a disposição da linha ao longo da cidade;
- a quantia e a localização das subestações que alimentam a linha.

### 6.1. Oportunidades

Quando são feitos estudos a respeito de uma linha de transporte público elétrico em massa, com o intuito de levantar os aspectos dessa linha que favorecem ou desfavorecem certo tipo de tecnologia, deve-se tentar ao máximo

explorar os potenciais e aspectos mais evidentes e que facilitariam a implementação de cada tipo de tecnologia, de modo a otimizar o resultado final dos estudos e evidenciar os ganhos trazidos por tal sistema. A seguir, descreveremos alguns pontos importante que são fundamentais de ser considerados em estudos de viabilidade e desempenho das diversas tecnologias existentes.

#### **6.1.1. Linhas sem catenárias**

Sistemas isentos de catenárias oferecem uma nova oportunidade para os transportes públicos, em especial para os bondes elétricos que operam em centros históricos de cidades, onde deseja-se evitar o impacto visual de linhas aéreas. Fontes de alimentação ao nível do solo têm sido implementadas em várias cidades, e sistemas indutivos atualmente estão sendo desenvolvidos para melhorar a confiabilidade do sistema, mirando a alta eficiência energética.

Sistemas de armazenamento de energia móveis, instalados a bordo do veículo, podem ser uma parte da solução para permitir que um veículo elétrico possa percorrer uma certa distância (1-2 km), sem a necessidade de ser alimentado por uma linha elétrica aérea. O sistema é carregado através de energia de frenagem recuperada na forma de energia elétrica ou através de uma infra-estrutura de carregamento rápido nas estações quando os passageiros estão embarcando. Eventualmente haverá trechos da linha em que esse sistema totalmente isento de alimentação elétrica em tempo real será inevitável, sendo que as baterias ou ultracapacitores podem ser recarregados mais efetivamente nesses trechos.

Para se realizar as estimativas de custo e eficiência e também dimensionar a linha de um meio de transporte público elétrico em massa, a opção dos sistemas à bordo devem ser levadas em conta, pois definirá os trechos onde haverá a necessidade da implementação de catenárias e também onde as fontes de alimentação que recarregam esses sistemas serão instaladas. Algumas pesquisas chegam à conclusão de que sistemas à bordo parecem ser demasiado caro para o único objetivo de recuperação energética, mas eles



podem oferecer uma solução confiável para operações livres de catenária numa curta distância, onde deseja-se um menor impacto visual em uma cidade.

#### **6.1.2. Proprietário da rede elétrica**

Sistemas ferroviários urbanos são alimentados por eletricidade, quer pelo uso de catenárias (linhas aéreas) ou um terceiro trilho colocados ao longo da pista. A rede é alimentada com energia elétrica proveniente de várias subestações que entregam a energia necessária. Essas subestações estão ligadas à rede de alta tensão, que por vezes é propriedade do fornecedor de energia local. Esta propriedade é a segunda questão crítica quando se investiga a oportunidade de instalar um sistema de recuperação de energia de frenagem na forma de energia elétrica, pois dependerá das condições de cobrança e possibilidades de abatimento da conta em casos de devolução de energia, regras que são definidas pelo próprio fornecedor local.

Quando a rede elétrica é propriedade do fornecedor local de energia, as empresas de transporte têm liberdade limitada nesta rede, por estarem submetidas às regras e condições impostas pelo fornecedor. Neste caso, a devolução da energia de volta à rede de alta tensão só é possível quando um acordo com o fornecedor de energia tenha sido assinado ou se existe uma legislação que regula o desconto da energia devolvida na conta de energia do operador de transporte público, como é comum ocorrer em diversos países. Se este não for o caso e se a energia não pode ser enviada de volta à rede, devem ser preferidas soluções estacionárias de armazenamento.

Em muitos casos o próprio operador do sistema de transporte possui sua rede elétrica, pois assim fica mais fácil criar as condições de operação necessárias para o seu sistema, e junto vem o benefício da possibilidade da devolução da energia de frenagem recuperada para a rede elétrica do fornecedor local de energia, através do uso de subestações reversíveis, que possibilitam o fluxo de energia elétrica em ambas as direções. Assim torna-se possível devolvê-la à rede elétrica.

No Brasil, segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, qualquer consumidor pode gerar sua própria energia elétrica através de fontes renováveis



ou recuperar parte da energia consumida por algum sistema elétrico e devolvê-la para a rede. Dessa maneira, não é possível receber um pagamento pela energia gerada, mas sim deduzir esse valor da conta de energia elétrica do estabelecimento ou serviço do consumidor. Assim sendo, os serviços públicos de transporte em massa elétricos podem também usufruir desse benefício.

### **6.1.3. Características da rede elétrica**

A configuração da rede elétrica é um elemento importante a considerar ao avaliar o potencial de economia de um sistema de recuperação de energia de frenagem, uma vez que irá determinar o perímetro em que as trocas de energia entre os veículos podem ocorrer. Em algumas redes de metrô ou bondes elétricos (presentes no exterior, principalmente nos países europeus) interligadas, uma subestação pode fornecer energia para ambas as linhas. Quando interligadas, a energia de frenagem de um veículo numa dada linha pode ser enviada para um veículo acelerando na outra linha.

No caso de uma única linha que trafega em dois sentidos, a instalação das subestações deve ser feita preferencialmente nas mesmas localidades das estações, pois é o ponto em que há a maior chance de haver um veículo acelerando enquanto há outro desacelerando. Essa sincronia pode ser otimizada através de sistemas eletrônicos, aumentando as possibilidades de cruzamento entre os veículos nas estações. Dessa maneira, quando a subestação está exatamente no mesmo local que a estação, a troca energética entre esses veículos será favorecida.

Quando uma rede elétrica está sobrecarregada, sendo solicitada por múltiplos veículos simultaneamente, será gerada uma elevada queda de tensão na rede, o que pode afetar seriamente a operação da rede de alta tensão. Nesses casos, apenas os sistemas de armazenamento podem aliviar a queda de tensão na rede através do fornecimento da energia necessária quando necessário, evitando assim o superdimensionamento ou a adição de novas subestações. Entretanto, um cenário mais adequado seria no caso em que o operador de transporte público possuísse suas redes elétricas próprias, que são alimentadas pela rede elétrica do fornecedor, mas que absorvem uma tensão

constante, sendo posteriormente tratada para alimentar os seus próprios veículos sem influenciar na rede do fornecedor local.

A recuperação de energia de frenagem, ao passar pelo inversor e ser fornecida em tempo real para outro veículo acelerando, passa através de componentes elétricos, os quais geram perdas e diminuem o rendimento dessa transferência. Logo, deve-se tomar certo cuidado quanto ao posicionamento dos inversores e das subestações ao longo das linhas, pois se a distância a ser percorrida pela corrente elétrica antes de chegar até outro veículo for muito extensa, pode ser que essa energia seja totalmente perdida, deixando de proporcionar a economia desejada.

#### **6.1.4. Topografia do terreno e tempo de ciclo dos veículos**

O número de estações na linha combinado com a distância entre elas terá grande influência sobre a energia de frenagem a ser recuperada. Redes urbanas como o metrô ou as de "trilhos leves" (aquelas onde circulam os bondes elétricos, geralmente trafegando nas ruas de centros urbanos) são mais adequadas do que as linhas regionais de trens para a recuperação de energia, devido ao fato de que a distância entre paradas consecutivas é reduzida. Contudo, mesmo se a proporção de energia recuperada for baixa, o montante total de energia recuperada pode ainda ser bastante alto e justificar o investimento em soluções de recuperação. Densas redes urbanas são mais adequadas para o uso de sistemas de recuperação de energia de frenagem, pois grande e constante poupança de energia permitirá recuperar o investimento em um período curto de tempo.

A inclinação das pistas também pode influenciar o potencial de recuperação de energia de frenagem disponível através do aumento da inércia do veículo. Em algumas situações, os sistemas de recuperação de energia de frenagem terão de ser superdimensionados para lidar com a energia total gerada por veículos em trechos em declive. Por outro lado, havendo frenagem e aceleração simultâneas em diferentes veículos em tais trechos, pode-se recuperar uma quantia considerável de energia e, se a transferência e o aproveitamento energético não forem em tempo real, soluções de

armazenamento móveis ou estacionárias podem ser utilizadas para estocar a elevada quantia de energia recuperada e ser utilizada para acelerar os veículos ou alimentar os demais equipamentos auxiliares elétricos das estações ou dos próprios veículos.

O tempo de ciclo entre dois veículos consecutivos será um forte fator para determinar a receptividade da linha quanto ao sistema de recuperação de energia de frenagem (demanda de energia na linha devido a trocas de energia entre veículos). Quanto maior o número de veículos em funcionamento simultâneo na linha, maiores as chances de ocorrer uma transferência energética de um veículo freando para um veículo acelerando. Em grandes redes com altas frequências (curtas distâncias percorridas e cruzamentos acelerando/desacelerando), as trocas energéticas entre veículos podem ser tão altas, mas a quantidade energética baixa, que a poupança de energia talvez seja bastante reduzida quando um sistema de recuperação seja implementado.

Contudo, ganhos substanciais podem ser obtidos durante tempos fora de pico, à noite ou aos fins de semana, quando menos veículos estão operando. Logo, devido à baixa economia global energética, pode ser que o investimento em tecnologias de recuperação de energia de frenagem não se justifique.

O contexto particular de sistemas automatizados de metrô também deve ser ressaltado. Metrôs precisam melhorar constantemente o seu desempenho, a fim de atender à crescente demanda sem comprometer a segurança. O grande diferencial dos últimos anos é o a operação do trem sem condutor (sistemas automatizados). Já existem mais de 30 linhas totalmente automatizadas em operação em todo o mundo. Linhas já existentes também serão majoritariamente adaptadas para operações automatizadas, mesmo que parcialmente, visto os benefícios provenientes de tal sistema frente à crescente demanda pelo aumento da eficiência das linhas.

A operação de um sistema de metrô automatizado tem um impacto direto e evidente em potenciais economias de energia, pois são normalmente caracterizados por altas frequências. Como resultado, a linha de receptividade é

fortemente melhorada, e a necessidade de sistemas de recuperação de energia de frenagem deve ser cuidadosamente avaliada.

Em comparação com um sistema de operação manual, um sistema automático também oferece oportunidades significativas para melhorar a receptividade da linha, otimizando a sincronização entre as fases de aceleração e desaceleração dos veículos. As programações dos ciclos podem ser configuradas de modo a criar essas sincronias, e intervalos de tempo muito pequenos podem ser criados entre um veículo acelerando e outro veículo freando, de modo a assegurar uma maior troca de energia entre eles.

#### **6.1.5. Tipo e idade dos veículos**

Os tipos de veículos utilizados na linha exercerão grande impacto sobre os possíveis resultados. Veículos mais recentes têm a capacidade de recuperar energia de frenagem e enviá-la de volta para a catenária ou para o terceiro trilho, pois seus freios funcionam com base em inversores, motores elétricos que mudam seus sentidos de rotação durante a frenagem, absorvendo a energia mecânica do movimento do veículo e convertendo-a em energia elétrica. Em algumas cidades e redes, veículos antigos e recentes são operados simultaneamente de modo que as trocas de energia entre veículos podem ser menos eficientes. A maioria dos veículos antigos também não têm a capacidade de regenerar energia de frenagem. Neste último caso, os investimentos em recuperação de energia de frenagem são naturalmente inúteis.

Nas linhas de metrô da cidade de São Paulo, os veículos operantes apresentam motores inversores de frequência e podem regenerar a energia de frenagem. Por outro lado, a baixa taxa de sincronização entre veículos acelerando e freando impede que a eficiência da recuperação energética seja elevada, o que pode ser um fator evidente que direcione a solução para os sistemas de armazenamento, móveis ou estacionários.

A densidade de veículos presente em uma certa rede de transporte público em massa elétrico será um fator que exercerá grande influência na capacidade regenerativa do sistema como um todo, pois o reaproveitamento energético dependerá da proximidade entre os veículos e de suas posições

relativas na rede. Não adianta haver muitos veículos circulando em uma rede se as distâncias entre eles são muito longas e se não ocorrem sincronias em alta frequência entre acelerações e desacelerações.

Quanto mais pesado for o veículo, mais energia de frenagem estará disponível. Quanto mais extensos forem os trechos em aative, combinados com a capacidade regenerativa dos veículos e suas elevadas massas, maiores as oportunidades de recuperar energia mecânica na forma de energia elétrica. Assim sendo, os veículos desempenham um papel importante ao estimar o potencial de recuperação em uma linha.

#### **6.1.6. Consumo de energia elétrica do sistema de recuperação**

Pelo fato de haver inúmeros componentes elétricos e eletrônicos por onde passam as correntes elétricas envolvidas na operação, sem falar nas próprias catenárias e terceiros trilhos, é evidente que ocorre uma elevada dissipação de energia na forma de calor, que é totalmente perdida para o ambiente e não pode ser recuperada de uma maneira prática e viável.

Apesar de serem constituídos por metais condutores que proporcionam baixa perda de energia na forma de calor, as catenárias e terceiros trilhos apresentam na maioria das vezes grandes extensões, o que certamente provoca uma elevada perda energética total. Com isso, dissipam calor e aquecem o ambiente, gerando outro problema.

O calor dissipado gerado aquecerá os túneis e estações, logo uma quantia energética significativa será utilizada para refrigerar e ventilar esses ambientes, caso contrário haverá desconforto térmico para os usuários e possíveis falhas elétricas poderão ocorrer. Logo, esse sistema é indispensável.

Nos sistemas onde ocorrem conversões de frequência e de tensões, e em que devem ocorrer sincronias entre os veículos e decisões automatizadas dos destinos e proporções adequadas da energia elétrica regenerada a ser consumida, os próprios componentes do sistema consumirão uma certa quantidade dessa energia regenerada, reduzindo a eficiência da regeneração.

Assim sendo, esse consumo deve ser considerado para saber-se como ele vai impactar na economia esperada. Um estudo visando comparar diferentes tecnologias mostrou que as “Flywheels” parecem ser os dispositivos de maior consumo energético, devido à sua necessidade de fazer a roda girar em torno de seu eixo a uma velocidade muito alta antes de começar a absorver a energia elétrica proveniente da frenagem, pois a corrente elétrica dessa energia regenerada por si só não possui intensidade o suficiente para vencer a inércia do disco metálico e colocá-lo em movimento.

#### **6.1.7. Sistema de armazenamento compartilhado**

No caso das opções de armazenamento, uma infraestrutura compartilhada entre o operador de transporte e o proprietário local da rede elétrica pode ser uma solução inteligente, uma vez que, quando os custos de investimento são compartilhados, uma melhor infraestrutura pode ser construída e os benefícios mútuos podem ser mais significativos.

O operador de transporte estará usando a capacidade de armazenamento durante o dia para fornecer energia à sua rede ferroviária, reduzindo assim a sua principal demanda de energia. Isso traz o benefício de não haver quedas significativas de tensão na rede elétrica, não afetando as demais operações que ocorrem no meio urbano junto ao funcionamento dos veículos elétricos.

O proprietário local da rede elétrica vai aproveitar essa energia armazenada como um distribuidor de recurso energético e usá-la no mercado das seguintes maneiras:

- **Resposta à Demanda:** como um recurso de energia distribuída, o dispositivo de armazenamento vai permitir carga-fornecimento quando os preços marginais da eletricidade são elevados, como em dias quentes de verão. Assim será possível uma redução no preço total da energia elétrica consumida, trazendo um benefício para os consumidores locais.
- **Recurso auxiliar durante situações emergenciais:** alguns países e regiões apresentam climas bem definidos, muitas vezes caracterizados por

épocas de escassez de água, logo é de se esperar que os níveis da água nas represas caiam e a geração de energia hidrelétrica seja afetada. Assim, esse sistema de armazenamento compartilhado poderá suprir a falta de energia em determinados períodos do dia nessas épocas. Além disso, o fornecimento poderá ocorrer durante eventuais blackouts devido a falhas técnicas ou operacionais.

- Reguladora de Frequência: como a rede local alimenta inúmeros tipos de equipamentos, que normalmente operam com a mesma frequência, essa rede deve também operar com essa frequência. Logo, sistemas eletrônicos automatizados devem captar a energia elétrica recuperada das frenagens dos veículos elétricos, armazená-la e, quando forem distribuí-la para outros equipamentos da rede, convertê-la adequadamente para suas frequência e tensão de operação. Para que isso seja corretamente proporcionado, um sistema em tempo real deve operar, medindo as demandas energéticas em quantia e intensidade de tensão, realizando as conversões e distribuições adequadas.

#### **6.1.8. Explicação das tecnologias estudadas e destaque para a mais promissora**

Como já vimos anteriormente, as tecnologias de regeneração e armazenamento energético da energia de frenagem de trens mais conhecidas e utilizadas mundialmente são:

- Baterias
- Ultracapacitores
- Flywheels
- Subestações Reversíveis

Cada uma das tecnologias citadas possuem suas vantagens e desvantagens, e cada caso de aplicação possui suas peculiaridades que podem direcionar a melhor solução para uma ou outra tecnologia, mas a tecnologia que melhor se adapta aos inúmeros cenários possíveis é a adoção das Subestações Reversíveis.

As Subestações Reversíveis se destacam frente às demais tecnologias por se preocuparem com uma regeneração quase que de 100% da energia de frenagem, pois utiliza de mecanismos e dispositivos elétricos que normalizam as frequências e tensões da energia regenerada, possibilitando que seja reutilizada por qualquer equipamento elétrico desde que devidamente tratada.

Usufruem também de “Smart Grids” que calculam em tempo real as demandas de tensão e frequência dos equipamentos elétricos conectados ao Grid nas redondezas do trem em desaceleração, convertendo a quantidade ideal na tensão e frequência necessárias para cada um dos equipamentos ou outro trem em aceleração nas proximidades. Caso haja um excesso de energia regenerada, existem também a possibilidade de revender a energia para a linha de transmissão, caso a legislação local permita.

A sua proposta de funcionamento em tempo real faz com que uma porcentagem extremamente alta da energia regenerada seja de fato aproveitada, uma vez que não será dissipada em resistores ou armazenada em baterias ou ultracapacitores que não conseguem manter a energia armazenada indefinidamente, havendo uma perda considerável com o passar do tempo caso essa energia não seja usada, além das perdas envolvidas nos fenômenos de transporte e armazenamento de cargas.

As experiências internacionais bem sucedidas com essa tecnologia são vastas, e temos como exemplo os seguintes casos já estudados anteriormente:

- Bélgica - Bruxelas: Companhia “STIB”  
Solução Adotada: INGETEAM INGEBER, com Conversores IGBT  
Economia Energética: 3.400 MWh/ano (9% da energia de tração)  
Tempo de Retorno do Investimento: 5 anos
- Alemanha - Bielefeld: Companhia “moBiel”  
Solução Adotada: INGETEAM INGEBER, com Conversores IGBT, em conjunto com sistemas de Flywheels  
Economia Energética: 1.100 MWh/ano (7% da energia de tração)  
Tempo de Retorno do Investimento: 10 anos (sem financiamento)



- Holanda do Sul (Países Baixos) - Roterdã: Companhia “RET”  
Solução Adotada: INGETEAM INGEER, com Conversores IGBT  
Eficiência ainda não mensurada, pois alguns problemas foram encontrados nas fases de teste da tecnologia, como a danificação de um transformador em uma estação devido a um curto-circuito no inversor. Por outro lado, sabe-se que houve uma experiência passada com Flywheels à bordo na qual o equipamento saiu do seu eixo de rotação e causou sérios danos ao veículo, fazendo com que a companhia descartasse esse tipo de solução devido aos riscos existentes e vivenciados.
- Espanha - Bilbao: Companhia Metro Bilbao  
Solução Adotada: INGETEAM INGEER, com Conversores IGBT  
Economia Energética: 6.000 MWh/ano (12,19% do total consumido)
- Espanha - Málaga: Companhia ADIF  
Solução Adotada: INGETEAM INGEER, com Conversores IGBT  
Economia Energética: 1.450 MWh/ano (12% do total consumido)
- Inglaterra - Londres: Companhia “UK: Transport for London”  
Solução Adotada: Alstom HESOP com Conversores IGBT  
Economia Energética: 5% da energia de tração  
Tempo de Retorno do Investimento: 5 anos
- França - Paris: Companhia “RAPT”  
Solução Adotada: Alstom HESOP com Conversores IGBT
- Itália - Milão: Companhia “ATM”  
Solução Adotada: Alstom HESOP com Conversores IGBT
- Arábia Saudita - Riyadh: Companhia “ADA”  
Solução Adotada: Alstom HESOP com Conversores IGBT

Assim sendo, considerando os vastos casos internacionais de aplicação, sendo a maioria deles seguros, bem sucedidos e com eficiência de regeneração

energética acima da média, optamos por estudar mais detalhadamente a tecnologia de Subestações Reversíveis.

Outro fator que também direcionou o desenvolvimento do estudo para as Subestações Reversíveis foram as informações existentes no relatório da convenção do projeto *Ticket to Kyoto*, que é imparcial e também destaca a tendência para a adoção em escala global dessa tecnologia, bem como destaca-a como mais promissora frente às outras alternativas existentes no mercado.

Como as Tabelas 25 e 26 retiradas do *Ticket to Kyoto* mostram, os sistemas “*Back to the Grid*” estacionários e as Subestações Reversíveis apresentam maiores vantagens frente às outras tecnologias, e possuem uma versatilidade e flexibilidade muito maiores.

## 7. EMPRESAS MAIS PROMISSORAS E SEUS PRODUTOS

### 7.1. Alstom e Ingeteam: Panorama Geral

Quando abordamos o panorama global da comercialização de soluções em economia e regeneração energética a partir da frenagem de trens, duas são as empresas que mais se destacam nesse segmento: Alstom e Ingeteam.

Ambas as empresas atuam majoritariamente no setor de energia elétrica, oferecendo soluções diversas para uma ampla gama de aplicações distintas, como nos setores de geração, distribuição, armazenamento, reaproveitamento, consumo e, como estamos estudando, no setor de regeneração energética.

Suas soluções são conhecidas mundialmente, existindo inúmeros casos de aplicação em uma grande quantidade de países e cidades. A grande maioria dos projetos de transportes elétricos sobre trilhos em nível global possuem a participação de uma dessas duas empresas em grande parte do processo de implementação da infraestrutura, desde os estudos de viabilidade até a manufatura, instalação e operação dos equipamentos necessários.

No próprio Brasil a Alstom ocupa uma posição de extrema importância nas obras de expansão e melhoria das redes metroviárias do Estado de São Paulo,

principalmente no que diz respeito às tecnologias de eficiência e regeneração energética.

A Alstom e a Ingeteam desenvolvem soluções muito semelhantes relacionadas à regeneração da energia de frenagem dos trens, existindo assim uma elevada competitividade no mercado global entre as duas empresas. Mesmo sendo parecidas, cada tecnologia tem seus pontos fortes e fracos que, dependendo do caso de aplicação e das condições topográficas, políticas, sociais e de disposição dos elementos da rede metroferroviária locais, uma pode ser usada em detrimento da outra.

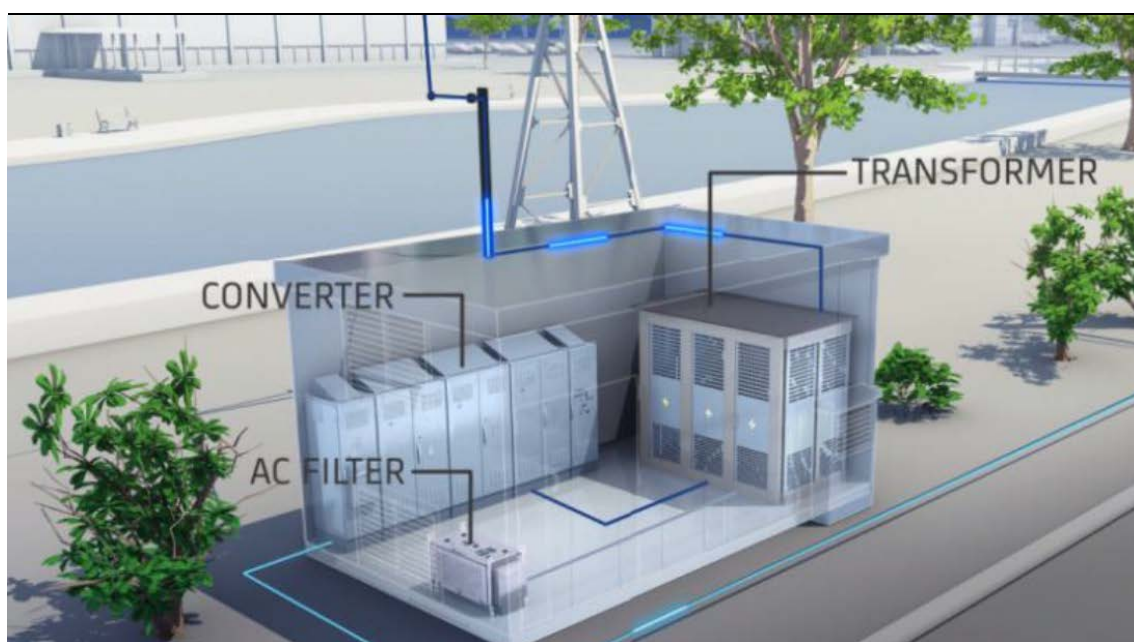
A seguir faremos um resumo das tecnologias de Subestações Reversíveis das duas empresas, seus alcances e níveis de influência globais e os níveis de eficiência e regeneração energética atingidos com o uso e aperfeiçoamento de seus produtos, de modo a reunir informações que possibilitem posteriormente concentrarmos os nossos esforços em detalhá-las.

#### **7.1.1. Alstom HESOP: Harmonic & Energy Saving Optimiser**

Como resposta às preocupações econômicas e ambientais dos operadores, a Alstom projetou a HESOP, uma subestação de fornecimento de energia avançada, projetada para oferecer a melhor eficiência energética e redução de custos de infraestrutura para as redes de transporte metroferroviário urbano e suburbano. A novidade da HESOP está em seu conversor único específico com regulação dinâmica que otimiza a potência necessária para a tração e capta mais de 99% da energia recuperável durante o modo de frenagem.

A tecnologia HESOP é a única solução "all-in-one" que oferece simultaneamente funções de tração e recuperação energética dentro do mesmo equipamento.

**Figura 35 – Esquema da Subestação Reversível HESOP**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

A HESOP traz benefícios em várias aplicações e em todos os estágios do projeto, desde a construção até a operação e manutenção. A HESOP permite aumentar a distância entre as subestações, reduzindo assim suas quantidades: de 5 a 7 subestações convencionais podem ser substituídas por de 4 a 6 subestações do tipo HESOP, dependendo do layout da malha metroferroviária e dos dados operacionais. Isso resulta em menores investimentos em infraestrutura, de uso e ocupação do território local e obras civis.

Ao contrário dos inversores ou soluções de armazenamento estacionária, a HESOP está equipada com regulação de tensão dinâmica, o que permite a captura de mais de 99% da energia geralmente perdida durante a frenagem, sem interromper a troca natural de energia entre os trens. A energia recuperada pode ser devolvida à rede elétrica ou reutilizada por equipamentos elétricos existentes na estação (elevadores, escadas rolantes, iluminação, ventilação, ar condicionado, aquecimento, mecanismos de sinalização, etc) ou por outros trens acelerando nas proximidades da estação. Isso implica em até 40% de economia de energia de tração, dependendo das especificidades operacionais da rede e da disposição e distância entre os seus elementos.

**Figura 36 – HESOP: Fluxo energético no sistema**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

A HESOP garante a alta qualidade da energia regenerada, evitando assim possíveis penalidades aplicadas pelo fornecedor ou cria privilégios de custos reduzidos pelo consumo da energia. A energia recuperada também pode ser facilmente revendida para a operadora, se não for completamente utilizada dentro da rede e caso esteja dentro das especificações de tensão e frequência da rede local.

Graças à recuperação total da energia de frenagem disponível que leva à alta receptividade da linha e dos periféricos alimentados, a HESOP limita a dissipação de calor do trem. Isso leva à necessidade de uma menor ventilação no tunel e na estação e a um uso menos frequente de ar condicionado, bem como possibilita a remoção dos resistores de freio a bordo, nos quais a energia é inteiramente dissipada na forma de calor, sendo perdida. Com isso, o peso do trem é reduzido, o que contribui para a redução da energia de tração necessária para movimentá-lo.



**Figura 37 – Fluxo energético dos trens para a rede elétrica**



Fonte: HESOP All-in-One Energy & Cost Saver

A HESOP atende a redes de metrô, bondes elétricos e veículos sobre trilhos em redes suburbanas que operam entre 600V e 1500V DC, novas ou existentes. Atualmente a HESOP encontra-se em operação na França desde julho de 2011, no “Paris Tramway T1”, uma linha de bondes elétricos fundada em julho de 1992 e operada pela companhia RAPT (Autonomous Operator of Parisian Transports) que interligar as comunas francesas de Les Courtilles e Noisy-le-Sec. Está também em comissionamento para a implementação no metrô de Londres, na linha Victoria (Reino Unido). Outras implantações incluem o metrô de Milão e o “Milan Tramway”, na Itália, e o metrô de Riyadh, na Arábia Saudita.

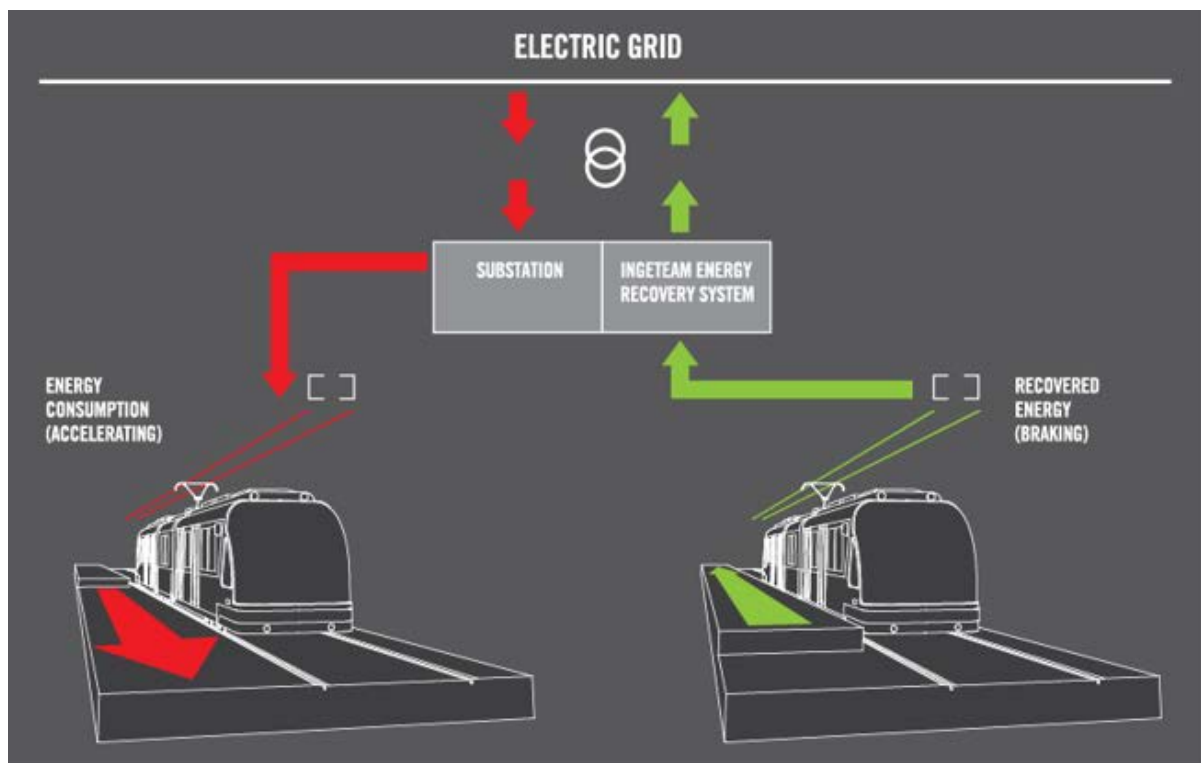
Em conjunto com a ATM (Azienda Trasporti Milanesi, operadora do metrô de Milão), a Alstom iniciou o desenvolvimento de uma nova versão da HESOP para linhas de metrô e trens suburbanos com elevado consumo energético. Este projeto foi selecionado pelo “Life + Programme” da “European Comissão” (que será abordado mais à frente), cujo objetivo é promover ações ambientalmente amigáveis. O seu desenvolvimento é 50% financiado pela União Europeia.

### 7.1.2. Ingeteam INGEBER: INGETEAM Braking Energy Recovery

A Ingeteam é uma empresa que desenvolve soluções e sistemas para a troca eficiente de energia em diferentes setores que, combinadas com sua expertise em engenharia veicular e operações ferroviárias, oferece soluções que fazem com que todas as partes envolvidas ativamente neste setor possam implementar melhorias significativas. Suas soluções e sistemas centram-se principalmente na melhoria de aspectos que, para as operadoras, são fatores-chave, como custos de exploração, confiabilidade, disponibilidade, manutenção e eficiência energética.

Hoje em dia, é normal que a engenharia veicular incorpore sistemas de frenagem regenerativa em seus produtos. No entanto, em DC os sistemas de regeneração de energia cinética não podem ser usados com grau ótimo de eficiência, pois estão equipados com subestações elétricas unidirecionais. Assim, o uso da energia regenerada é limitado aos casos em que há outro veículo acelerando nas proximidades, sendo a energia regenerada excedente dissipada na forma de calor nas resistências à bordo do veículo.

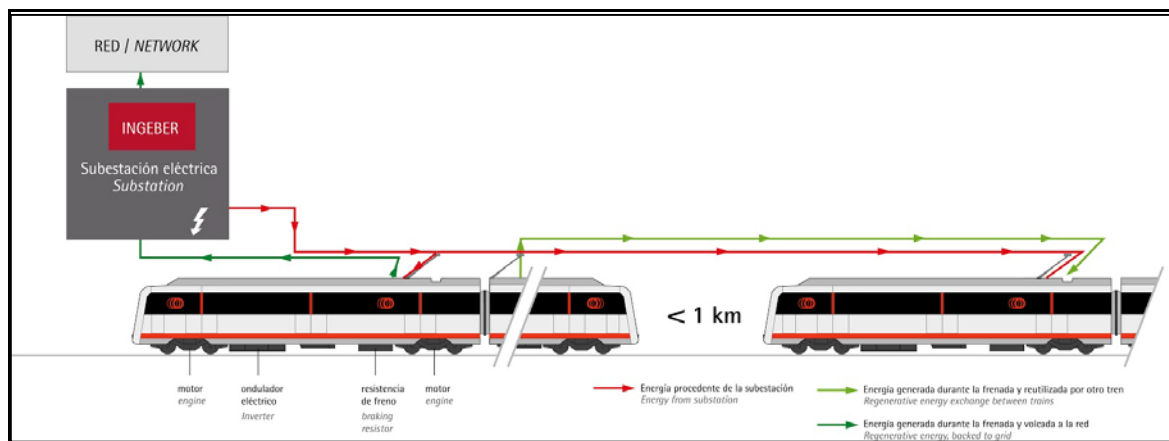
**Figura 38 – Fluxo energético em tempo real entre trens**



Fonte: Romo A. REVERSIBLE SUBSTATION IN HEAVY RAIL – ENERGY RECOVERY WORKSHOP – 07/2015

A solução INGEBER, oferecida pela INGETEAM, é compatível com as subestações existentes nas linhas metroferroviárias atuais e permite que todas as limitações associadas ao reuso da energia de frenagem regenerada sejam superadas e o seu aproveitamento de fato ocorra.

**Figura 39 – INGEBER: Fluxo energético entre trens**



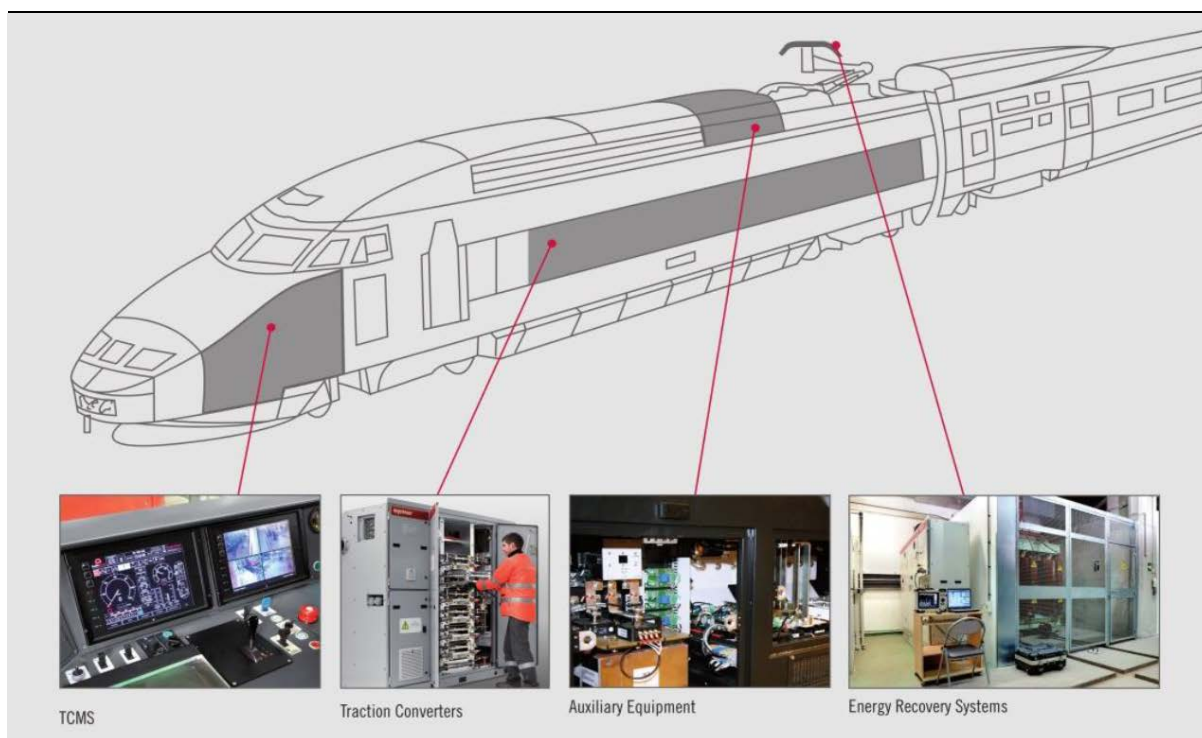
O passo anterior à instalação do sistema é uma análise da rede existente com um software desenvolvido pela Ingeteam, levando em consideração as características do sistema para que os novos sistemas a serem instalados possam ser definidos, tanto do ponto de vista técnico como do ponto de vista do retorno sobre o investimento. O sistema INGEBER, desenvolvido pela Ingeteam, permite que todas as limitações associadas ao reaproveitamento da energia de frenagem regenerada sejam superadas.

O sistema consiste em equipamentos eletrônicos instalados na subestação e conectados aos equipamentos principais nela já existentes, como os transformadores e os retificadores. O sistema monitora continuamente a catenária até detectar o ponto em que há energia de frenagem de um veículo que não pode ser usada por um outro veículo acelerando em suas proximidades. Neste momento, o sistema extrai essa energia da catenária e transforma-a de acordo com os parâmetros de qualidade da rede de suprimento para que essa energia possa ser nela injetada. A solução INGEBER possibilita reutilizar a



energia recuperada, alimentá-la de volta à rede, consumi-la nas instalações do sistema e das estações ou armazená-la.

**Figura 40 – Componentes do sistema INGEBER**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

## 8. DETALHAMENTO DAS TÉCNOLOGIAS

Mapeadas as duas empresas que dominam o segmento global de soluções em regeneração de energia de frenagem de veículos sobre trilhos, bem como destacadas suas respectivas soluções desse gênero (Alston HESOP e Ingeteam INGEBER), agora usufruiremos de dados provenientes de relatórios gerenciais e administrativos, dados de mercado e materiais de marketing para detalhar cada uma dessas tecnologias, de modo a realizar um estudo bibliográfico a respeito de cada uma.

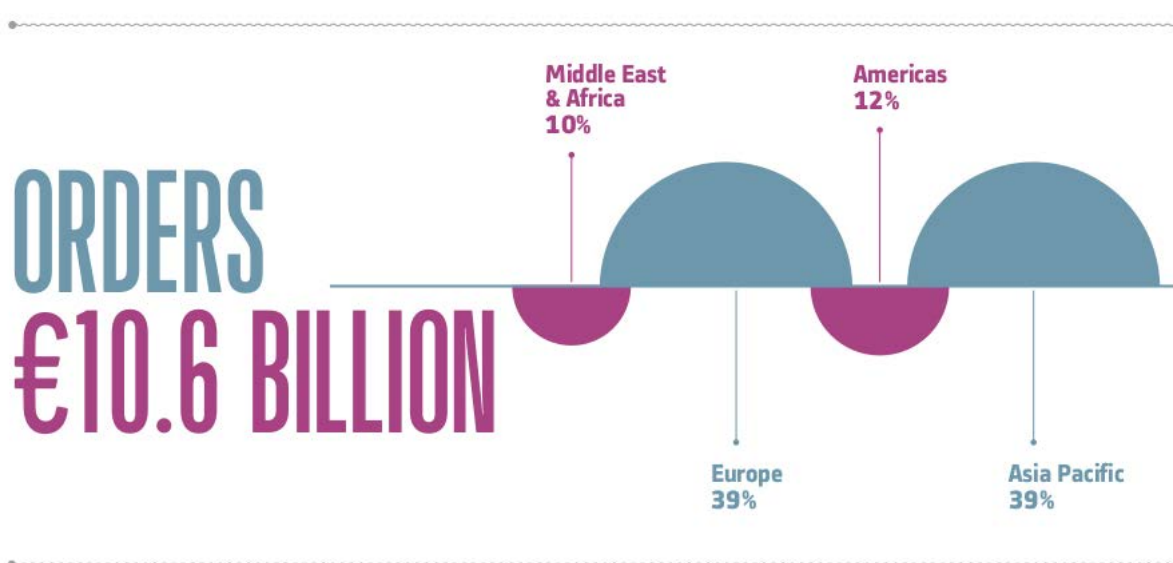
### 8.1. Alstom HESOP: Harmonic & Energy Saving Optimiser

Como promotora da sustentabilidade, a ALSTOM produz e vende sistemas, equipamentos e serviços focados em trens e metrô. Fabrica desde trens de alta performance, até os mais comuns, além de diversos serviços customizados, de infraestrutura, sinalização, etc. É líder mundial em sistemas integrados sobre trilhos e está presente em mais de 100 sedes espalhadas em

cerca de 60 países e emprega cerca de 31000 pessoas segundo dados de 2015/2016.

Numa escala econômica, seus recursos advem: 46% de veículos vendidos dos mais variados tipos, 17% de equipamentos de sinalização, 15% de variados sistemas integrados e de infraestrutura e os outros 22% relacionados aos serviços oferecidos pela empresa.

**Figura 41 – Distribuição percentual das receitas da Alstom mundialmente**



Fonte: Alstom Activity Report 2015/16

A empresa que concentra suas atividades principalmente nas zonas europeias e asiáticas se destaca pela criação do HESOP, que já vendeu cerca de 500 exemplares pelo mundo todo.

#### **8.1.1. HESOP: Motivação**

A Alstom criou a HESOP, uma solução de energia avançada, para melhorar significativamente a eficiência energética e otimizar a potência necessária para a tração, resultando em economia de energia e redução de custos de infraestrutura.

A necessidade global de investimentos em soluções sustentáveis e o crescente custo da energia elétrica global fazem com que novas soluções de engenharia sejam necessárias para propiciar um ambiente dentro do qual a sociedade e a economia possam evoluir sem impedimentos. Pensando nesse

aspecto, a Alstom desenvolveu o HESOP pensando no futuro do nosso planeta, de modo a poupar recursos que em muitas localidades são escassos e promovendo uma maior longevidade aos serviços e sistemas e recursos existentes dentro de uma sociedade.

#### **8.1.2. HESOP: Objetivos e Desafios**

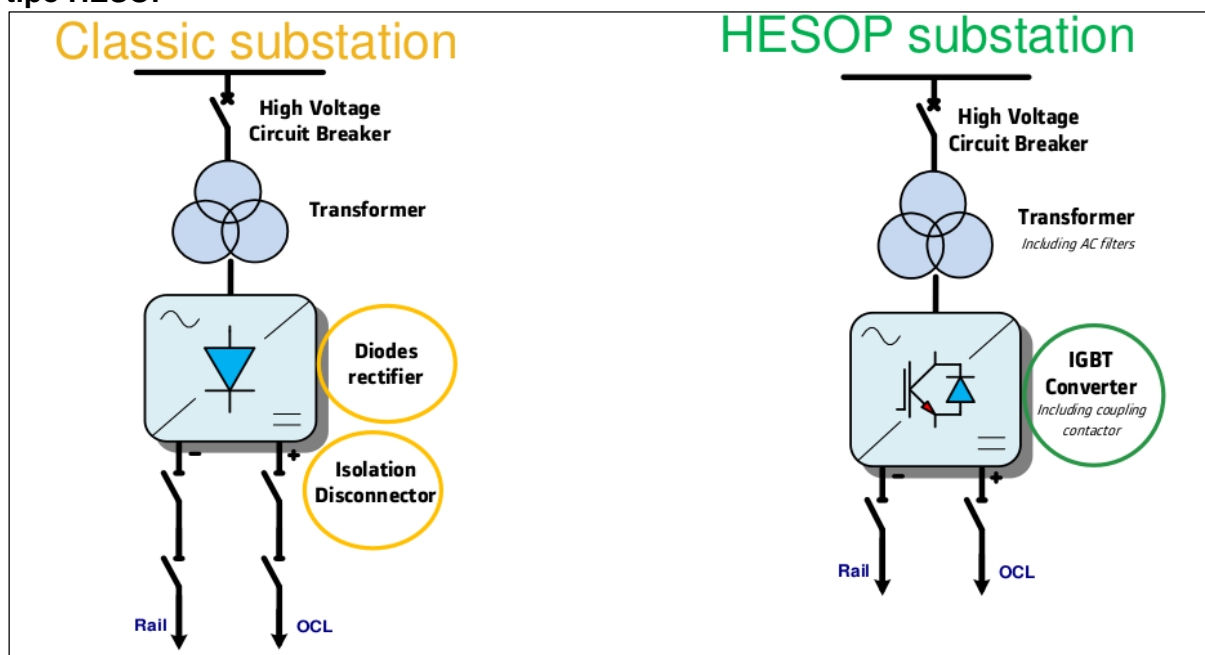
O HESOP foi criado com o intuito de minimizar o número de subestações utilizadas, fomentando o sentido de energia elétrica verde, minimizando ao máximo os recursos utilizados e os produtos liberados à atmosfera. Tudo isso alinhado com um design tecnológico a partir de recursos ambientalmente corretos.

#### **8.1.3. HESOP: Descrição Geral**

Consiste numa ponte retificadora de tiristores (família de dispositivos semicondutores multicamadas, que operam em regime de chaveamento) associada com um conversor IGBT e um controlador de voltagem dinâmica. A ponte retificadora opera apenas em modo de tração, enquanto o inversor opera como um filtro ativo.

Durante a frenagem, regenera energia em corrente alternada. Tanto o retificador quanto o inversor são controlados dinamicamente com um único controlador que alterna os diferentes modos sem nenhum tempo morto. Isso otimiza a potência requerida para tração e recupera 99% da energia durante a frenagem, diminuindo a perda de energia e o custo operacional das linhas.

Figura 42 – Esquema comparativo entre uma subestação clássica e uma do tipo HESOP



Fonte: HESOP All-in-One Energy & Cost Saver

#### 8.1.4. HESOP: Benefícios

Com o HESOP, o número de subestações conseguiu ser diminuído em torno de 20% com maior distanciamento entre as mesmas. Isso acarreta em menos serviço usado na implementação das mesmas, menos verba gasta e menos cabos e equipamentos tanto para compra, quanto para manutenção.

A quantidade de calor produzida também é um forte ponto do HESOP: necessita de menos ventilação e condicionamento de ar, reduzindo os custos de manutenção das linhas. Vale destacar também que as subestações descartam grande parte dos resistores antes usados para frenagem. Nos trens, a eficiência é menor, devido a menor quantidade de usuários que usam a rede e que usufruem da energia recuperada.

**Figura 43 – Resistor típico de trens usado nas frenagens. Alta emissão de calor e adição ao peso dos veículos**



Fonte: HESOP All-in-One Energy & Cost Saver

A eficiência na recuperação de energia de frenagem chega a passar os 99%. Essa energia, de alta qualidade, é recuperada para o funcionamento de equipamentos internos e o excedente é reinjetado na rede elétrica. Algumas empresas como a ENDESA(Espanha) e a EDF(França) compram a energia excedente pelo mesmo valor que vendem, além de gerarem descontos no preço da energia, através de incentivos fiscais.

**Figura 44 – Aplicação da energia recuperada dentro das estações: uso em sinalizações iluminação, escadas-rolantes, dentre outros**



Fonte: WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. (2014)

Na operação dos trens, há maior disponibilidade das linhas, uma vez que as subestações permanecem em funcionamento mesmo em picos inesperados. A linha tem boa estabilidade, mesmo em caso de flutuação de corrente alternada. As redes podem ser mais facilmente ampliadas caso haja necessidade de modificação da tensão da linha ou haja um incremento significativo do seu tráfego. A manutenção da linha também possui seus prós, como o menor gasto de freios mecânicos, funções de monitoramento remoto e a função de degelo da catenária.

No quesito ambiental, além de menos energia gasta e feito com um design ecológico, há menor emissão de gás carbônico para a atmosfera. O equipamento na versão de 1500V foi selecionado pela LIFE+ europeia como promotor de ações ambientalmente amigáveis.

#### **8.1.5. HESOP: Evolução do Produto**

- **2009-2011** – OPEX orientado, com duplo conversor e water cooler (refrigeração):

Recuperação de energia de alta qualidade mas com eficiência ainda longe da ótima.

- **2012 – 2013** – CAPEX é implementado junto do OPEX, conversor é único e a refrigeração agora é feita a ar:

Foi possível com o CAPEX uma grande redução do número de subestações usadas, além da diminuição do tamanho das subestações e da quantidade de equipamentos usados. A eficiência em recuperação de energia de frenagem chegou a ser de 99%.

#### **8.1.6. HESOP: Mecanismo de funcionamento**

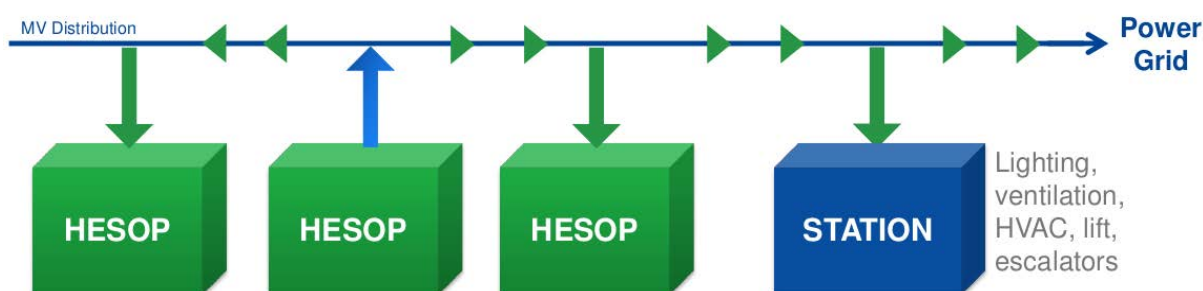
O HESOP é a grande evolução das subestações reversíveis, formado apenas por um conversor que atua tanto como retificador quanto como inversor. Funciona em redes com ligações diretas que operem entre 600 e 1500 V, e de 0.9 até 4 MW tanto no âmbito urbano, como suburbano.



Dentre as principais vantagens desse equipamento, destaca-se a possibilidade de capturar energia recuperável em situações de frenagem e fornecer voltagem dinamicamente - otimizando a energia recuperada em modo de tração.

Durante a frenagem, os motores de um trem funcionam como geradores, transformando energia em eletricidade novamente. Essa energia pode ser usada pelos próprios trens, por trens próximos em aceleração, pelas estações em diversos equipamentos (iluminação, escadas rolantes, sinalização, etc) e o excedente é reinjetado na rede elétrica.

**Figura 45 – Ilustração da distribuição típica da energia recuperada dentro de uma linha convencional**



Fonte: HESOP All-in-One Energy & Cost Saver

**Figura 46 – Esquema comparativo entre uma subestação clássica e uma do tipo HESOP**



Fonte: HESOP All-in-One Energy & Cost Saver



### 8.1.7. HESOP: Cases

- **Londres**

Em 2013, a ALSTOM assinou um contrato com o metrô de Londres fornecendo um sistema HESOP como teste em uma subestação da linha Victoria que foi instalado em 2014. O metrô de Londres, conhecido como “The Tube”, devido aos profundos túneis circulares, serve 270 estações e abrange 405 km, dos quais 55% são subterrâneos. Construída em 1960, a linha Victoria carrega 200 milhões de passageiros por ano, sendo uma das linhas mais usadas de Londres.

**Figura 47 – Trem modelo Bombardier da Alstom na linha Victoria, Londres**



Sua extensão é inteiramente subterrânea, o que é de grande importância, uma vez que o HESOP tem como um de seus grandes objetivos a diminuição da dissipação de calor nos túneis e a linha sofre constantemente com tal problema. O HESOP permite o aprimoramento do sistema de refrigeração da linha, além de poupar o uso de resistores, permitindo menos peso aos trens e assim menos energia gasta.

Dados:

- Conversor e transformador de 630V e 780kW.
- Subestação Cloudesley Road

### Competências:

- Design
- Fornecimento
- Supervisão na instalação
- Comissionamento
- 3 Meses de observação e medições de performance

**Tabela 27 – Especificações da linha e da subestação da linha Victoria, Londres**

Use	Recovery
Installation	Indoor
Type of converter	IGBT
Type of cooling	Natural Air
Command	Performed from a dedicated controller
Nominal Power	780 kW
Nominal Current	1083 A at 720 V <sub>DC</sub>
Overloads	150% 2h, 300% 1min, 450% 15sec – Class VI & VII
Protection degree	IP 31
Auxiliary non-secured voltage	230 V <sub>AC</sub>
Auxiliary secured voltage	110 V <sub>DC</sub>
THDI (current and voltage)	< 5%
Efficiency	> 95%
Switching frequency	PWM modulation, i.e. no constant frequency
Regulation	Dynamic regulations based on voltage & current analysis

### LINE SPECIFICATIONS

Length of Victoria line	21 km (13 miles)
Topography	Mainly underground
Number of stations	16
Traction power supply	630 V <sub>DC</sub> , four rail system

Fonte: HESOP energy saver Longon Underground

- Paris

A Alstom junto com RATP, implementou os sistemas de recuperação em uma linha de VLT de Paris. A operação, que acontece desde julho de 2011 conta com uma subestação HESOP de 750V e 900kW, 8 subestações clássicas de 900 kW em uma linha de 12km de extensão.

A implementação garantiu a linha 99,97% de disponibilidade energética, com regulação dinâmica de tensão e perfeita compatibilidade com a rede existente, garantindo alta qualidade de energia recuperada.

#### **8.1.8. HESOP: Contratos em andamento**

- **Milão(Metro):**

1 subestação HESOP 1500v 4MW - objetivo: reduzir as emissões de gás carbônico em 15%.

- **Milão(VLT):**

8 subestações HESOP duplas (16 conversores HESOP 600V 1MW) - objetivo: reduzir o número de subestações de 10 para 8 e diminuir a seção dos cabos alimentadores de energia.

- **Riyadh:**

32 subestações HESOP duplas (64 conversores HESOP 750V 1.2MW) - objetivo: remover o grande número de resistores usados na frenagem e otimizar seus sistemas energéticos.

- **Sidnei:**

9 subestações HESOP de 750V e 1.2MW e mais 4 de 2MW - objetivo: reduzir o número de subestações de 14 para 13.

- **Panama:**

7 subestações com 8 conversores HESOP de 1500V e 4MW - objetivo: reduzir o número de subestações e aumentar a eficiência energética.

## 8.2. Ingeteam INGEBER: INGETEAM Braking Energy Recovery

### 8.2.1. INGEBER: Motivação

Atualmente, existe um crescente interesse em melhorar a eficiência energética dos sistemas de transporte ferroviário. Os motivos desta tendência são claros:

- Reforçar o posicionamento da ferrovia como meio de transporte ecológico como resultado da introdução de desenvolvimentos tecnológicos que contribuem para uma redução de consumo energético e de emissões de poluentes atmosféricos;
- Reduzir os custos operacionais dos operadores.

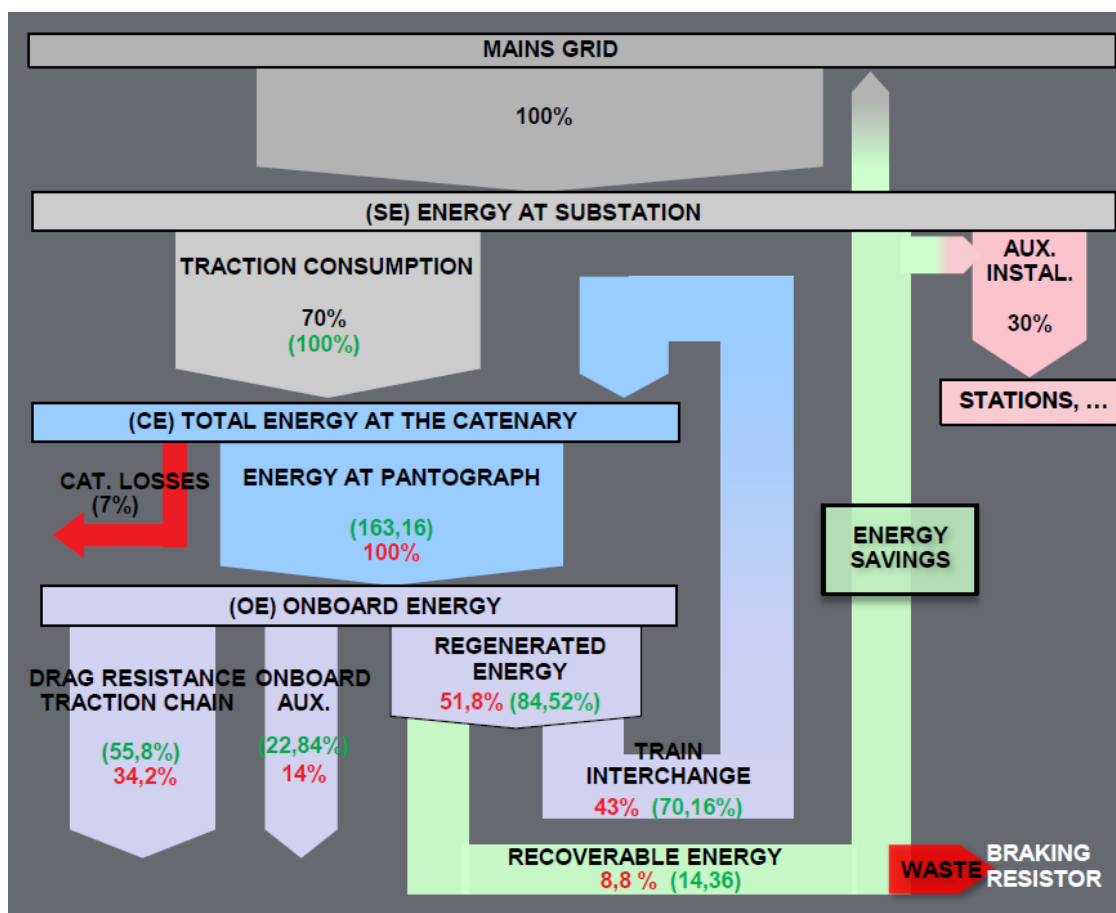
A Ingeteam está ciente dos desafios enfrentados atualmente pelos operadores ferroviários. Como especialistas em desenvolvimento e fabricação de sistemas e equipamentos que promovem eficiência energética e otimizações na operação, a Ingeteam fornece ao setor ferroviário equipamentos que contribuem para melhorar esses aspectos, sendo assim atingida uma maior eficiência em termos de energia de tração consumida pelos veículos e de máxima utilização da eletricidade presente no sistema.

### 8.2.2. INGEBER: Objetivos e Desafios

A Ingeteam, com a implementação do sistema INGEBER, tem como objetivo principal oferecer soluções em regeneração de energia de frenagem em sistemas diversos já existentes, os quais variam em diversos aspectos entre si. Logo, o desafio e a meta principal da Ingeteam é fazer com que o sistema INGEBER se adapte e seja customizado para cada situação em específico. Para que isso aconteça, os seguintes parâmetros devem ser levados em consideração:

- Balanço Energético

**Figura 48 – Balanço energético em um sistema**



Fonte: Romo A. REVERSIBLE SUBSTATION IN HEAVY RAIL – ENERGY RECOVERY WORKSHOP – 07/2015

Um estudo detalhado do balanço energético do sistema como um todo é necessário, uma vez que o sistema deve garanti-lo em tempo real, calculando as necessidades de tensão e frequência específicas de cada um dos equipamentos em conjunto de modo a fazer com que o balanço energético seja atingido, sem falhas ou fugas.

- Customização em Cenários Variáveis

Devido à grande variabilidade dos cenários onde o sistema INGEBER será implementado, deve-se levar em conta parâmetros locais para dimensioná-lo, como:

- A corrente de tração dos veículos;
- A frequência de operação dos veículos;
- O nível de tensão em corrente contínua (DC) ou alternada (AC);
- As características da linha e da catenária;

- A temperatura ambiente, etc.

Essas peculiaridades levam à necessidade de uma análise prévia, que levará à construção de uma solução baseada no sistema INGEBER mas com peculiaridades existentes no sistema no qual ocorrerá a sua implementação.

- Necessidade de Simulações

Uma necessidade que jamais pode ser deixada de lado são as simulações via software e hardware que devem ser feitas ao longo de todo o processo de análise, desenvolvimento e implementação da solução. As variáveis que influenciam no dimensionamento e operação ótima do sistema são muitas, logo diversas fases de simulação e testes devem ser feitas de modo a garantir que todas as condições de contorno sejam identificadas e assim consideradas nos cálculos. Seguem exemplos de pontos fortes e fracos existentes em um cenário de simulação de implementação do sistema INGEBER:

- Pontos Fracos
  - Inúmeros parâmetros de entrada;
  - Elevada sensibilidade na acuracidade dos parâmetros de entrada;
  - Comportamento do sistema extremamente variável;
  - Variabilidades no sistema de tração dos veículos, etc.
- Pontos Fortes
  - Estima com precisão o número de sistemas a serem instalados;
  - Determina a melhor localização de cada um dos sistemas;
  - Dimensiona com precisão o sistema de regeneração energética;
  - Permite uma estimativa inicial precisa de energia economizada, etc.

### 8.2.3. INGEBER: Descrição Geral

No processo de operação de qualquer metrô, os trens freiam e aceleram de maneira periódica e contínua. Cada vez que o trem desacelera, ele gera energia cinética. Os sistemas de frenagem regenerativa incorporados pelos sistemas modernos permitem que a energia seja usada por um trem que está na mesma linha, em suas proximidades, no processo de aceleração.

No entanto, energia inexplorada é dissipada nos resistores à bordo dos veículos. A função do sistema INGEBER é recuperar o excesso de energia de frenagem regenerativa dos veículos de tração ferroviária que não pôde ser explorada e utilizá-la para o consumo de instalações internas ou para devolvê-la à rede de distribuição geral da empresa de energia elétrica local.

A Ingeteam desenvolveu uma ferramenta de simulação que permitirá realizar uma análise detalhada, possibilitando o dimensionamento dos sistemas de recuperação e um estudo econômico anterior. Portanto, é possível realizar um planejamento de investimentos associado ao sistema de trilhos analisado.

O sistema incorpora um conversor duplo conectado à catenária, em paralelo com o retificador da subestação até o transformador existente. A função do sistema é monitorar constantemente o estado da catenária, convertendo energia recuperável em energia em corrente alternada (AC) de alta qualidade e subsequentemente injetá-la na rede trifásica geral.

Além disso, o sistema também controla os harmônicos da rede trifásica, que atuam como uma frente ativa, permitindo uma ação reversível para fornecer energia à catenária durante os picos de consumo de energia, com consumo de energia de qualidade para a rede AC.

A ferramenta de simulação desenvolvida pela “Ingeteam Traction”, o setor interno da empresa dedicado ao desenvolvimento de tecnologias de tração metroferroviária, realiza um balanço prévio de energia do sistema ferroviário, simula os resultados da implementação do sistema de recuperação e, conseqüentemente, realiza o dimensionamento correto do sistema, juntamente com um estudo econômico previamente detalhado.



#### **8.2.4. INGEBER: Benefícios**

O sistema INGEBER baseia-se numa nova aplicação de uma tecnologia baseada na eletrônica de potência. O produto não necessita de quaisquer modificações nos sistemas já existentes (subestações, veículos, transformadores, catenárias, etc) e a sua instalação é totalmente autônoma e independente.

Em casos de falha, o sistema se desconecta automaticamente dos componentes aos quais está ligado, eliminando as chances de danificá-los. Com a instalação do sistema INGEBER, é dada à subestação uma capacidade de reversibilidade, de modo que um caminho para o aproveitamento da energia de frenagem dos trens seja aberto, sendo que em caso contrário a energia seria dissipada nos resistores, tornando também possível a injeção dessa energia na rede de distribuição ou na própria rede do operador.

As principais vantagens do INGEBER são:

- Não requer modificação de instalações das subestações existentes, aproveitando itens de alto valor, como os transformadores;
- O seu funcionamento é transparente para o sistema existente, de modo que possa ser isolado, sem interromper o operação do sistema;
- Não requer manutenção frequente como outros elementos mais sensíveis;
- O dispositivo não é afetado por curtos-circuitos ou outras falhas elétricas na catenária;
- A potência do sistema pode ser ajustada de acordo com a necessidade, sendo que a solução não é dimensionada estritamente para a potência instalada, e sim de modo a permitir flexibilidade em casos de variações de corrente e tensão durante a operação e também em casos de redimensionamento ou expansão futura da rede;
- A corrente devolvida à rede é trifásica e de alta qualidade, sendo gerado um par tensão - corrente contínua estável;
- Permite a reutilização da energia retornada à rede em outros ambientes, estando dentro dos padrões de qualidade necessários.

### **8.2.5. INGEBER: Evolução do Produto**

A padronização de alguns parâmetros da solução INGEBER têm feito com que o design, a fabricação e a instalação do produto tornem-se processos mais ágeis e facilitados, estando o sistema compactado em armários de fácil implementação, operação e manutenção, contendo todos os elementos essenciais para o seu funcionamento. Com o uso da INGEBER, a operadora ferroviária consegue reduzir a temperatura de suas instalações e economizar uma grande porcentagem do consumo convencional de eletricidade.

O metrô de Bilbao, por exemplo, utiliza 30% da energia de frenagem regenerada de seus trens para operar todas as suas instalações internas (elevadores, escadas, luzes, etc), e os 70% restantes retorna para a rede da companhia elétrica local, o que equivale ao consumo anual de cerca de 1.700 famílias. Além disso, mais de 95% da energia devolvida supera os parâmetros mínimos de qualidade exigidos pela operadora da rede elétrica local, tornando o reaproveitamento extremamente eficiente. Isso também faz com que a operadora da linha se consolide no mercado como um negócio sustentável e de elevado prestígio ambiental.

### **8.2.6. INGEBER: Alcance Global**

Em 2006, a companhia Metro Bilbao promove junto aos técnicos e engenheiros da Ingeteam uma solução para a remoção do excesso de calor em túneis causada pelo exaustivo processo de dissipação energética nas resistências de frenagem dos veículos.

Aproveitando a situação existente e a necessidade da resolução do problema do excesso de calor produzido, e também mantendo-se no seu segmento de atuação de grande cunho econômico, social e ambiental, a Ingeteam propôs o desenvolvimento de uma solução que não só resolveria o problema do calor excessivo, mas também possibilitaria o reaproveitamento dessa energia que antes era totalmente desperdiçada.

A partir desse instante, a Ingeber começou a desenvolver o seu produto INGEBER: INGETEAM Braking Energy Recovery, cujo foco inicial era utilizar um motor inversor que absorvesse a energia de frenagem dos trens e a converte-se em energia elétrica para ser utilizada em tempo real por outros veículos acelerando.

No ano de 2009 a Ingeteam instalou o primeiro protótipo da INGEBER em uma linha do metrô de Bilbao, o qual atendeu às necessidades de redução parcial da temperatura gerada, mas se não houvesse trens nas proximidades para aproveitar a energia regenerada, esse excedente ainda assim precisava ser dissipado nos resistores.

Aprimorando a solução, a Ingeteam criou mecanismos que possibilitam o tratamento de frequências e tensões da energia regenerada que, com o auxílio de smartgrids, conseguem mensurar em tempo real as necessidades energéticas e de corrente e tensão dos equipamentos existentes nas estações e distribuir corretamente essa energia aos equipamentos. Ainda assim, havia casos em que excedentes energéticos ocorriam.

Visando entrar em um acordo comercial com as operadoras de energia elétrica locais, a Ingeteam propôs a devolução da energia regenerada à rede local, o que proporcionaria uma redução nas contas das operadoras das linhas metroferroviárias e também colaboraria para a redução do consumo energético geral das cidades e bairros presentes nos arredores das linhas atendidas.

Assim, hoje em dia a Ingeteam oferece a solução INGEBER de maneira completa:

- Possibilidade de utilizar a energia regenerada por outros trens acelerando nas proximidades;
- Possibilidade de utilizar a energia regenerada internamente pela própria operadora de linha metroferroviária, alimentando os seus equipamentos auxiliares (elevadores, escadas rolante, iluminação, sistemas de sinalização, sistemas de refrigeração, etc);
- Possibilidade de conciliar a solução de regeneração com soluções de armazenamento, como baterias, ultracapacitores ou flywheels;

- Possibilidade de devolver a energia excedente corretamente tratada para a rede da operadora local de energia elétrica, caso a legislação permita.

#### **8.2.7. INGEBER: Fases de Implementação**

Todo sistema ferroviário possui características técnicas exclusivas:

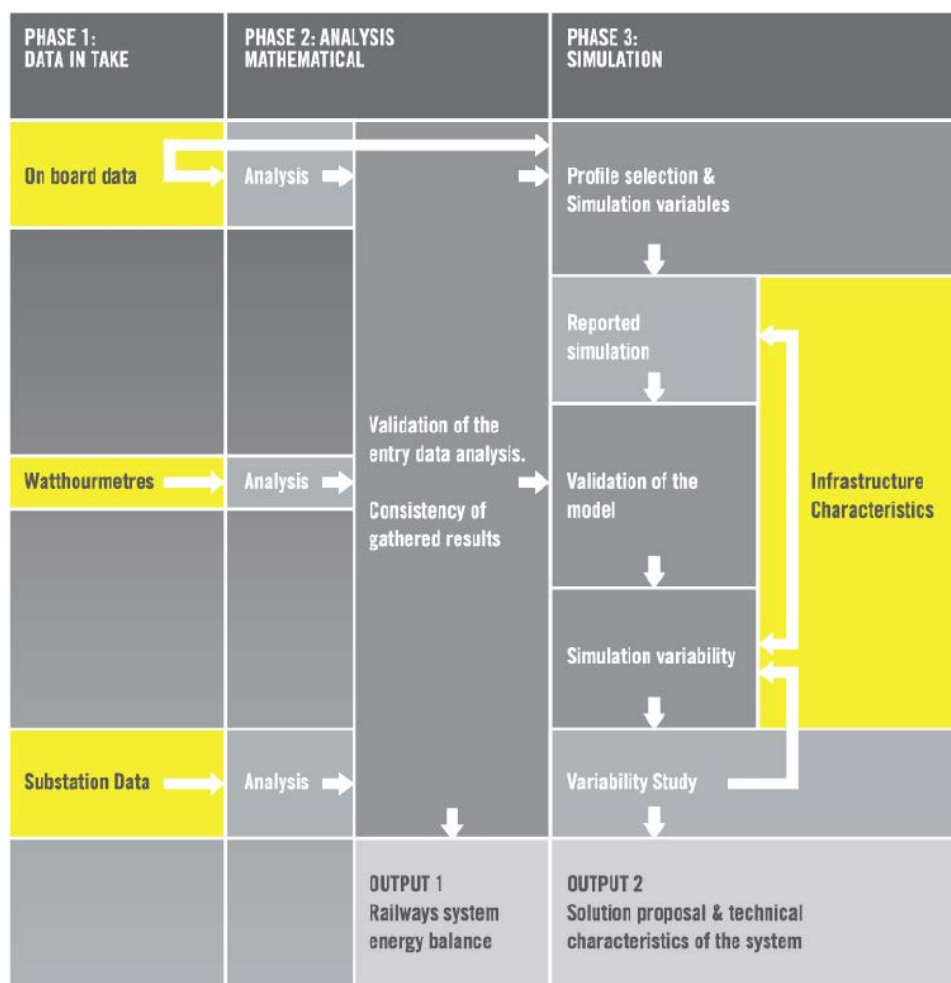
- Tipologia da catenária;
- Voltagem da catenária;
- Voltagem da rede elétrica;
- Números de subestações;
- Número de estações;
- Topografia local;
- Fluxo de tráfego da linha;
- Perfil de linha ao longo de sua extensão e variações;
- Mecanismo de movimentação dos trens;
- Outros.

É necessário desenvolver uma engenharia anterior para avaliar a energia consumida, a potência do sistema, pontos de conexão ótimos e a taxa de investimento de retorno.

São três as principais fases que antecedem o início do desenvolvimento e da implementação da solução:

1. Coleta de dados:
  - a) Dados gerais dos trens;
  - b) Medições de consumo energético;
  - c) Dados das subestações já existentes.

**Figura 49 – Fluxograma das fases de implementação do sistema INGEBER**



Fonte: I RAIL TECHNOLOGICAL FORUM FOR INTERNATIONALIZATION - 2011

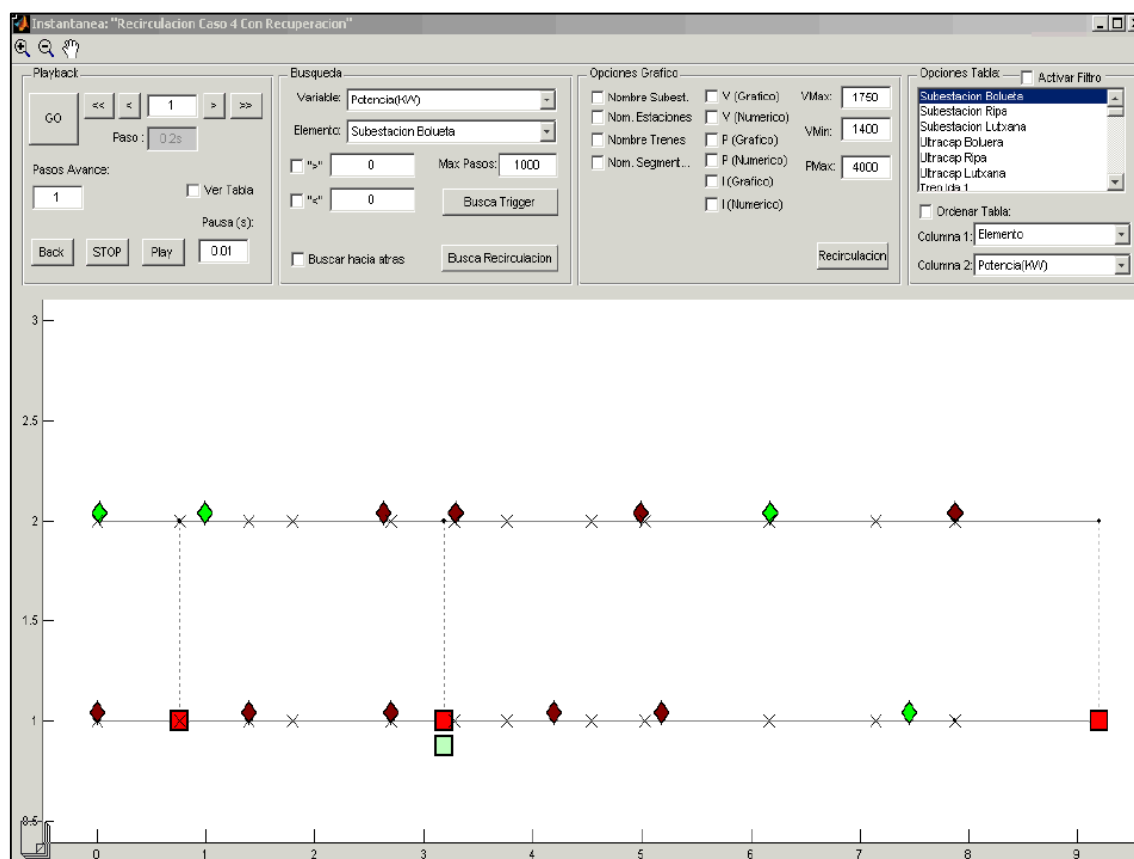
2. Análise matemática:

- a) Validação do Input de dados;
- b) Garantia da consistência dos dados coletados;
- c) Balanço energético, de correntes e de tensões da linha.

3. Simulação:

- a) Seleção do perfil de modelagem e das variáveis da simulação;
- b) Geração de simulação inicial;
- c) Validação do modelo;
- d) Considerações de variabilidades no modelo;
- e) Estudo detalhado das variabilidades e possíveis cenários;
- f) Output de uma proposta técnica de solução;
- g) Output das características do sistema.

**Figura 50 – Software de simulações para o dimensionamento do sistema**



Fonte: I RAIL TECHNOLOGICAL FORUM FOR INTERNATIONALIZATION - 2011

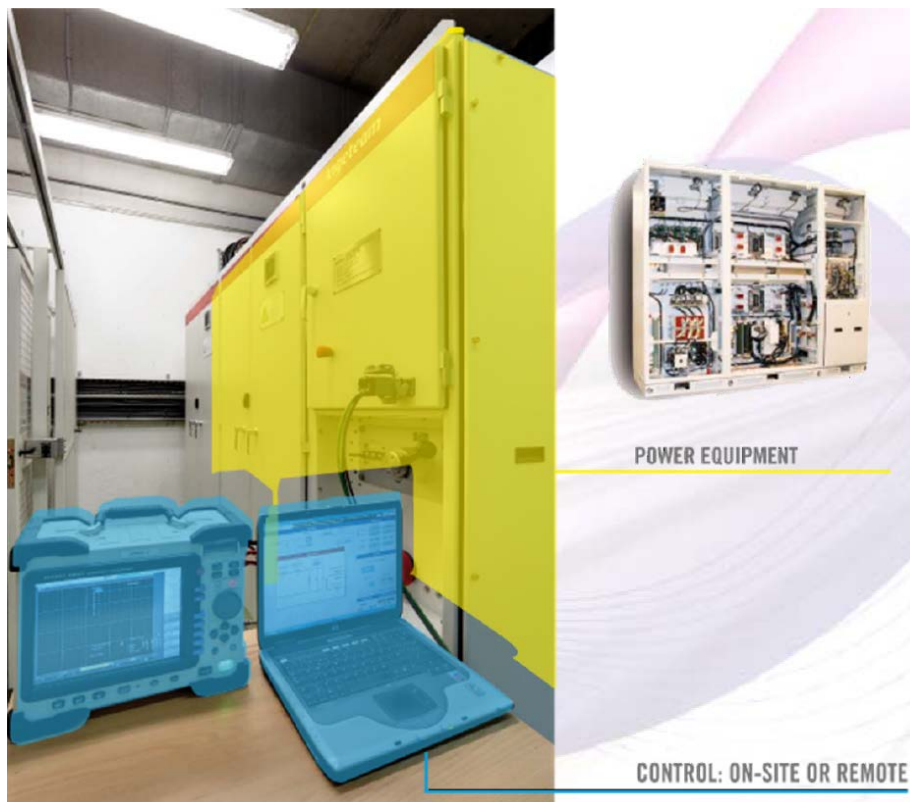
Com todos os dados e resultados das simulações em mãos, a Ingeteam pode apresentar uma proposta completa de engenharia baseada na solução INGEBER, contendo:

- O número de sistemas INGEBER a serem instalados;
- A distribuição geográfica e espacial de cada sistema;
- As necessidades energéticas e potenciais de regeneração de cada sistema;
- As informações técnicas pontuais de aspectos diversos dos sistemas INGEBER ao longo da linha.

Finalmente, a Ingeteam fornece todos os equipamentos necessários para a operação do sistema, realiza a sua instalação com o auxílio de empresas terceiras parceiras e participa do seu primeiro processo de inicialização, controlando os mecanismos envolvidos, fazendo as calibrações necessárias e analisando ao longo de um certo intervalo de tempo o comportamento das

variáveis, monitorando-as de modo a detectar possíveis falhas iniciais de implementação e reagindo caso necessário.

**Figura 51 – Sistema INGEBER e seus controladores (locais ou remotos)**



Fonte: I RAIL TECHNOLOGICAL FORUM FOR INTERNATIONALIZATION - 2011

**Figura 52 – Posicionamento dos transformadores da subestação**



Fonte: I RAIL TECHNOLOGICAL FORUM FOR INTERNATIONALIZATION - 2011



#### **8.2.8. INGEBER: Cases**

- Espanha - Bilbao

Inicialmente, a Ingeteam instalou no metrô de Bilbao 5 sistemas de recuperação de energia com devolução para a rede. O sistema INGEBER, integrado nas subestações do metrô de Bilbao, é transparente para sua operação e soluciona diversas limitações de recuperação de energia.

A solução INGEBER foi completamente implementada no Metro Bilbao rede depois de simulações, estudos preliminares e a instalação de um protótipo, que ficou em operação durante mais de 1 ano. O sistema é composto de um conversor duplo, conectado à catenária e em paralelo com o retificador da subestação e ao transformador já existente. A INGEBER monitora o estado da catenária em todos os momentos, e se há energia para ser recuperada, a converte em corrente alternada de alta qualidade e que é consumida pelos constituintes da própria subestação ou devolvida para a rede trifásica da operadora de energia elétrica local.

Inicialmente, foi estimada uma regeneração energética de mais de 6.000 MWh anuais.

**Tabela 28 – Características do Sistema INGEBER em Bilbao**

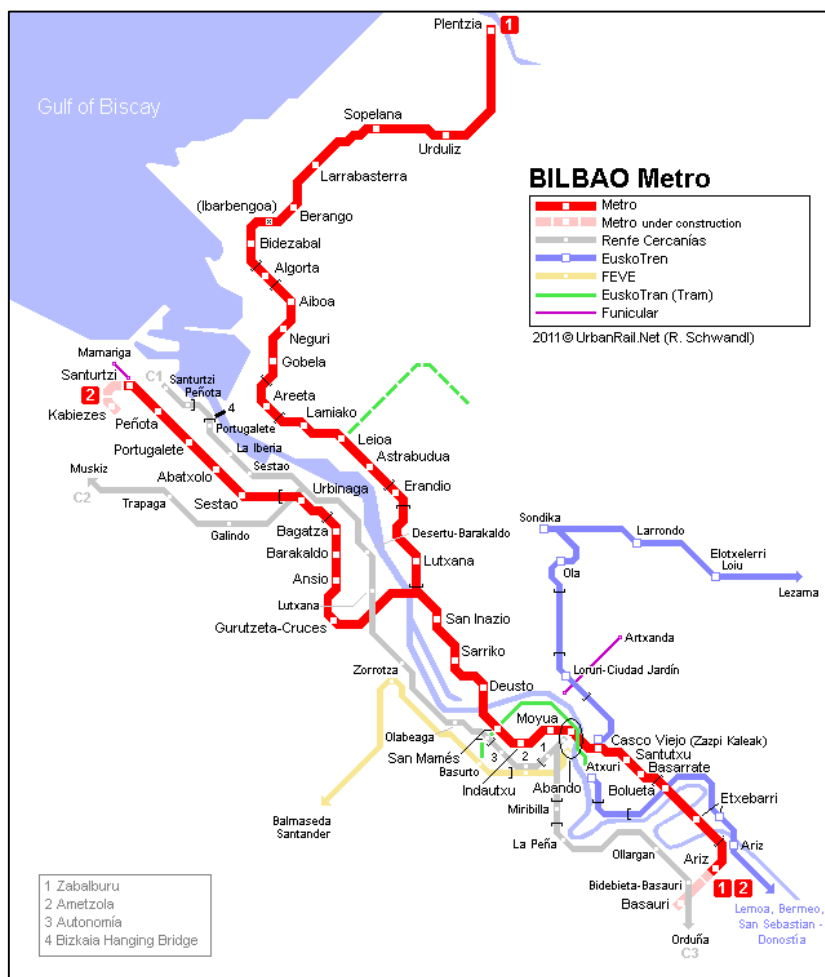
Catenary voltage:	1,500 Vdc
Alternating voltage:	1,150 Vac
Maximum power:	1,500 kW
Rated power	800 kW
Alternating current, max.:	750 Arms
Direct current max.:	1,000 A
Total harmonic distortion (THD):	< 3%
Output frequency:	50 Hz
Cooling system:	Forced Air

Fonte: INGEBER E01 - Energy Recovery Systems for Metro Bilbao

Características das linhas:

- Tensão DC: 1500Vdc
- Trens Regenerativos: Uso de Conversores AC-IGBTs
- Frequência de Passagem dos Trens: até 2,5 min no trecho comum
- 2 Linhas
- 42 km
- 11 Subestações
- 39 Estações
- Consumo de tração anual: 52 GWh

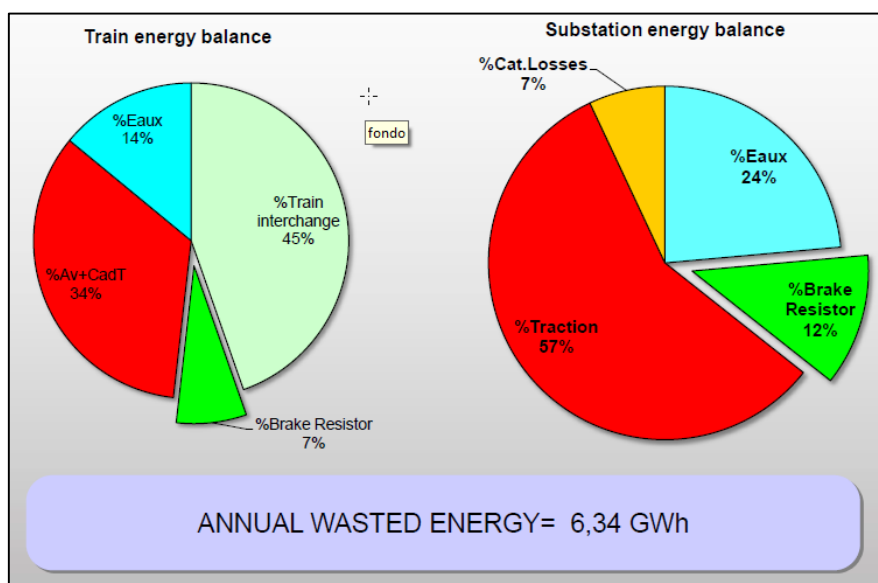
**Figura 53 – Mapa do Metrô de Bilbao**



Fonte: INGEBER E01 - Energy Recovery Systems for Metro Bilbao

As linhas 1 e 2 do mapa, em vermelho, são as atendidas pelas subestações reversíveis INGEBER, sendo atendidas na íntegra pelo sistema de regeneração. A seguir, podemos analisar a composição do consumo energético dessas duas linhas, anteriormente à implementação do sistema INGEBER.

**Figura 54 – Composição de consumo, metrô de Bilbao**



Fonte: Romo A. REVERSIBLE SUBSTATION IN HEAVY RAIL – ENERGY RECOVERY WORKSHOP – 07/2015

Como o sistema possibilita 99% de recuperação da energia regenerativa de frenagem, seja para o uso interno da operadora do sistema de trens ou para a devolução à rede elétrica local, o consumo total é igual à toda a energia anteriormente desperdiçada, de 6,34GWh/ano. Esse valor representa cerca de 12,19% do total global de energia consumida pelo sistema, de 52GWh/ano, o que causa uma drástica redução nos custos de operação do sistema como um todo.

- Espanha - Fuengirola

A Ingeteam instalou o sistema INGEBER na linha C1 do sistema ferroviário da cidade de Fuengirola, na província de Málaga, na Espanha, com a possibilidade de reinjetar a energia regenerada na rede elétrica local.

O sistema foi inicialmente implementado na estação de Benalmádena, sendo posteriormente expandido a outros 3 sistemas. O sistema atualmente encontra-se em operação absoluta e efetiva, resolvendo as limitações antes existentes de recuperação energética, devolvendo parte da energia regenerada à rede elétrica local.

Figura 55 – Mapa do sistema ferroviário de Fuengirola



Fonte: INGEBER E02 - Sistema de recuperación de energía para la línea C1, Málaga

Os sistemas instalados consistem em conversores IGBT duplo conectados à catenária, em paralelo aos retificadores e ligados aos transformadores já existentes. O estado energético e de tensões da catenária é monitorado em tempo real, e quando há energia recuperável disponível, o sistema detecta-a automaticamente e a converte em corrente alternada de alta capacidade, a qual retorna à rede trifásica geral.

**Figura 56 – Trens do sistema ferroviário de Fuengirola**



Fonte: INGEBER E02 - Sistema de recuperación de energía para la línea C1, Málaga

A linha C1 do sistema apresenta as seguintes características:

- Tensão DC: 3300V DC
- Trens Regenerativos: Uso de Conversores AC-IGBTs
- Frequência de Passagem dos Trens: 20 min
- Linhas de trilho único
- 31 km de extensão
- 3 Subestações INGEBER instaladas
- 18 Estações
- Consumo de tração anual: 6 GWh

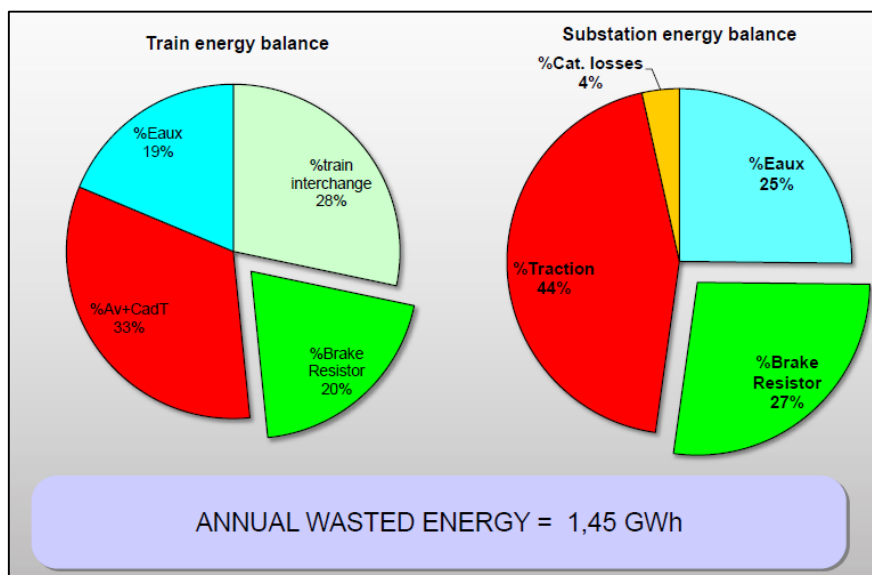
**Tabela 29 – Características dos sistemas INGEBER instalados em Fuengirola**

Catenaria:	3,000 Vdc
Corriente Alterna:	1,300 Vac
Potencia Máxima:	2,000 kW
Potencia Nominal:	645 kW
Potencia Alterna, max.:	444 A
Corriente Continua:	666 A
TDD:	<5%
Frecuencia de salida:	50 Hz
Sistema de refrigeración:	Aire forzado

Fonte: INGEBER E02 - Sistema de recuperación de energía para la línea C1, Málaga

Os gráficos a seguir apresentam a composição percentual do consumo energético total do sistema, tanto da energia consumida pelos trens quanto da energia consumida nas estações.

**Figura 57 – Composição de consumo, sistema ferroviário de Fuengirola**



Fonte: Romo A. REVERSIBLE SUBSTATION IN HEAVY RAIL – ENERGY RECOVERY WORKSHOP – 07/2015

Nessa situação, como há somente 3 subestações INGEBER instaladas ao longo da linha C1, a energia regenerada mensurada chega a 12% do consumo total da linha, sendo que o seu potencial máximo é de cerca de 24,17%.

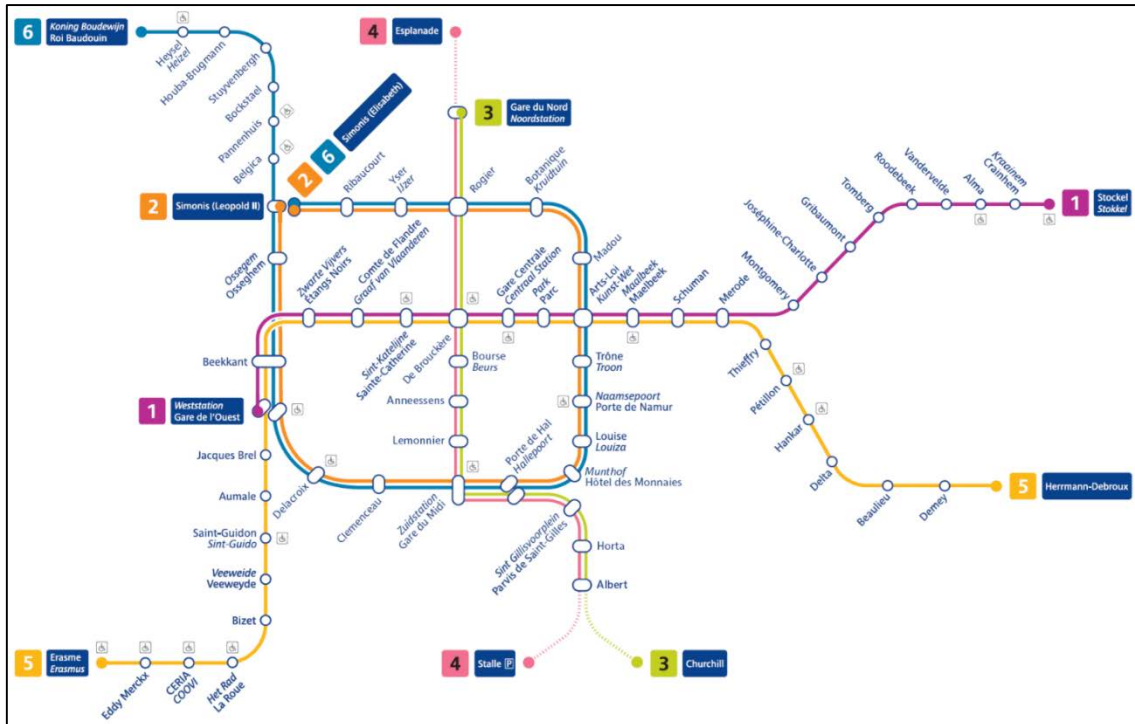
- Bélgica - Bruxelas

Entre fevereiro e junho de 2013 a companhia STIB, operadora da rede de metrô de Bruxelas, convidou três fabricantes para testar seus sistemas de recuperação de energia nas proximidades da estação de Houba-Brugmann, na linha 6. O seu objetivo era estar com um sistema completo e executado na linha 6 até março de 2015. Os fabricantes eram as empresas Siemens, AEG e Ingeteam, e o sistema INGEBER da Ingeteam superou os demais sistemas testados em questões de eficiência e performance operacional.

Estima-se que a implementação dos conversores Ingeber ao longo da linha 6 resultaria em uma economia anual De 25 milhões de euros em contas de eletricidade, e um contrato foi concedido à Ingeteam em julho de 2014 para a implementação de mais cinco subestações. No outono de 2015, a instalação e o comissionamento estavam em progresso. Os seis conversores INGEBER foram



**Figura 58 – Mapa do metrô de Bruxelas**



Atualmente, as linhas 2 e 6 do metrô de Bruxelas contam com a presença de 14 subestações INGEER ao longo de suas extensões. Essas linhas apresentam as seguintes características:

- Tensão DC: 750V DC
- Trens Regenerativos: “Chopper DC. Series Motor”, com o uso de Conversores AC-IGBTs
- Frequência de Passagem dos Trens: 3 min no trecho comum
- 16 km de extensão
- 14 Subestações INGEBER instaladas
- 26 Estações
- Consumo de tração anual: 40 GWh

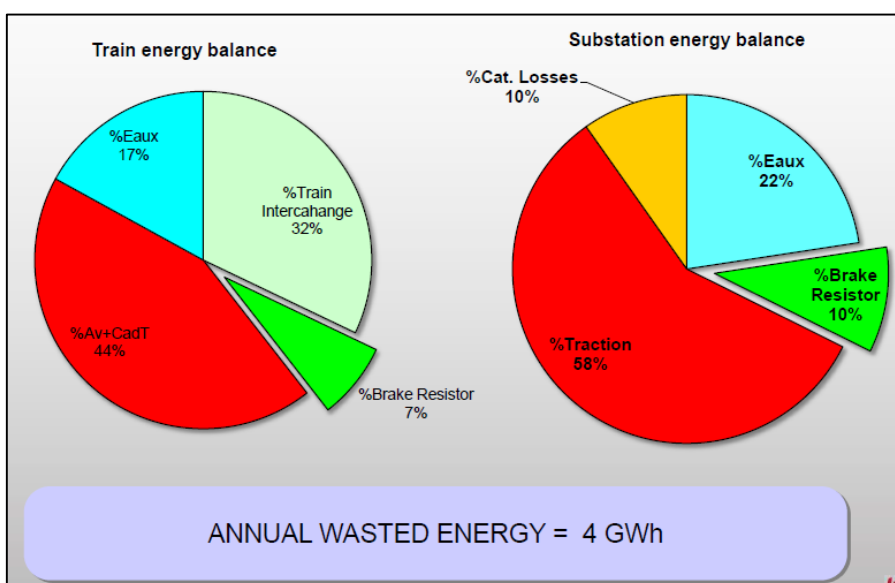
**Tabela 30 – Características dos sistemas INGEBER instalados em Bruxelas**

Catenary voltage:	750 Vdc
Max. Power:	1,500 kW
Nominal Voltage	750 Vdc
Voltage Max. DC:	900 Vdc
AC Side Current, max.:	1,375 A
AC voltage nominal:	630 Vac
THD%	<5%
Output frequency	50Hz
Cooling system:	Forced Air

Fonte: INGEBER E04 - Energy Recovery Systems for Brussels Metro

Os gráficos a seguir apresentam a composição percentual do consumo energético total do sistema de metrô de Bruxelas, tanto da energia consumida pelos trens quanto da energia consumida nas estações.

**Figura 59 – Composição do consumo energético do metrô de Bruxelas**



Fonte: Romo A. REVERSIBLE SUBSTATION IN HEAVY RAIL – ENERGY RECOVERY WORKSHOP – 07/2015

Nesse caso, como o headway entre os trens é curto (3 minutos) e as distâncias entre estações é menor, bem como há um número maior de subestações INGEBER instaladas, é de se esperar que o consumo energético seja maior, o que de fato ocorre. Como os gráficos mostram, um consumo de até 4 GWh é possível, correspondendo a 10% da energia total consumida pelo sistema.

Devido a outras questões de otimização na operação, melhorias nos componentes e integração ótima do sistema INGEBER com os demais sistemas existentes, foi possível obter na prática economias que chegaram a até 12% da energia total consumida mensal.

**Figura 60 – Sistema INGEBER instalado no metrô de Bruxelas**



Fonte: INGEBER E04 - Energy Recovery Systems for Brussels Metro

É estimado que a implementação da tecnologia INGEBER no metrô de Bruxelas possibilitou uma redução de cerca de 40% nas emissões locais de CO<sub>2</sub>, reduzindo também as contas com energia elétrica em 25 milhões de euros.

#### **8.2.9. INGEBER: Oportunidades Futuras**

- Brasil - Rio de Janeiro

Segundo dados do site da Ingeteam, divulgados no dia 9 de agosto de 2016, a empresa passará a atuar no setor de recuperação de energia pela primeira vez na América, e a cidade pioneira escolhida foi o Rio de Janeiro, no Brasil. Após o desenvolvimento e o sucesso de diferentes projetos na Europa, o Rio de Janeiro é uma das próximas cidades a reduzir o consumo de energia em seu sistema de metrô com a adoção do sistema INGEBER.

A Ingeber implantará na cidade do Rio uma subestação compatível com redes de 750, 1500 e 3000 kV, que pode poupar na faixa de 30 a 50% do total de energia desprendida, além de diminuir consideravelmente a emissão de CO<sub>2</sub>

para a atmosfera. O sistema é ideal para trechos urbanos e suburbanos, devido à grande quantidade de estações e, conseqüentemente, paradas.

O Metrô Rio reduzirá sua conta de energia e suas emissões, instalando o sistema INGEBER em uma subestação localizada na linha 2. Barcelona, Bilbao, Bruxelas (Bélgica), Bielefeld (Alemanha) e Wien (Áustria) também reduziram o consumo de energia e as emissões sobre operações ferroviárias, com a implementação do mesmo sistema.

Os dados divulgados ainda são muito escassos, mas o próprio site de Ingeteam divulgou que a implantação será feita em uma subestação da Linha 2 do metrô do Rio de Janeiro, podendo ser expandida ao longo do tempo.

- Áustria - Viena

A companhia Wiener Linien, operadora do metrô de Viena (Viena U-Bahn - *Untergrundbahn*), selecionou a Ingeteam para fornecer um sistema de recuperação de energia que permitirá que a empresa reduza suas emissões de CO2 e reduza sua conta de energia.

O sistema será instalado na subestação perto da estação Hardeggasse na linha U2 do sistema Viena U-Bahn e será transparente para o sistema existente. A energia recuperada será usada pelo operador internamente.

Em 2015, o número de passageiros de Wiener Linien era de 939 milhões de passageiros. Em média, cerca de 2,5 milhões de passageiros utilizam os sistemas da companhia Wiener Linien, composto por linhas subterrâneas, de ônibus e de trens, a cada ano.

Tendo em mente o objetivo de reduzir o consumo de energia, a tecnologia INGEBER da Ingeteam foi selecionada por sua capacidade de recuperar entre 10% a 30% da energia de tração ferroviária.

Após quatro anos de investigação pela Ingeteam Traction Division e um investimento de mais de 3 milhões de euros, a empresa desenvolveu e aperfeiçoou um sistema para converter o calor da energia de frenagem em energia elétrica para ser retornado à rede elétrica.

Este sistema é ideal para trens, bondes e metrô suburbanos, dado que em todos esses sistemas existe a necessidade de realizar muitas paradas, o que é precisamente o instante em que a solução recupera a energia cinética dos trens.

- Espanha - Barcelona

Recentemente, no final de 2015, a Ingeteam ganhou um contrato em Barcelona para a instalação da tecnologia INGEBER. A companhia Infraestrutura Ferroviária da Catalonia (Ifercat) selecionou as empresas espanholas Ingeteam e Istem para instalar o sistema de recuperação de energia da Ingeteam na linha 9 do metrô de Barcelona, que recuperará entre 10% a 30% da energia de frenagem produzida pelos trens da linha.

O sistema oferece uma capacidade de regeneração energética de 2 MWh com energia recuperada usada para iluminação e para mover escadas rolantes. Espera-se que o projeto produza um retorno sobre o investimento em seis a oito anos e deveria ter sido concluído no verão de 2016. Não foram encontradas maiores informações a respeito da execução ou do desempenho do sistema após o ano de 2016.

Enquanto a Ifercat possui as linhas 9 e 10 em Barcelona, o operador de metrô TMB da cidade diz que planeja instalar sistemas similares de recuperação de energia em outros lugares da rede em um futuro próximo. O metrô de Barcelona transportou 375,75 milhões de passageiros em 2014.

#### **8.2.10. INGEBER: Conclusão**

O sistema INGEBER da Ingeteam consiste em uma solução de regeneração de energia de frenagem de veículos sobre trilhos que se mostrou muito eficiente no cenário global de redução de consumo energético. A postura da empresa Ingeteam diante do cenário econômico, ambiental e social atual é bem definida, existindo de sua parte um engajamento extremamente alto e de grande importância para o mercado energético mundial.

A solução, como pudemos ver com os exemplos dos cases reais, obteve um destaque muito relevante no campo ao qual é destinada, sobressaindo-se

frente a outras tecnologias existentes nesse segmento, superando-as não só em aspectos de eficiência mas também de performance operacional e facilidade de implementação e manutenção.

Como o sistema foi desenvolvido de forma flexível, possibilitando uma fácil adaptação a qualquer sistema já existente sem modificá-los, muitas operadoras metroferroviárias ganharam interesse na solução e apostaram na implementação da tecnologia. A Ingeteam, por sua vez, comprovou a eficiência teórica e prática da solução, mostrando a eficácia do seu produto com resultados reais.

Apesar de a maioria das soluções já implementadas pela Ingeteam estarem concentradas na Europa, que é uma empresa de origem espanhola, a tecnologia INGEBER já ganhou um destaque de posição extremamente relevante no âmbito internacional, e está a cada dia que passa sendo de interesse de mais operadoras metroferroviárias ao redor do mundo que desejam resolver os seus problemas de aquecimento e consumo energético.

A tecnologia ainda é recente, e não se pode considerar que já está em estado ótimo de confiabilidade e segurança, mas a tendência é que, com o seu crescimento e a comprovação de mais casos de sucesso, a tecnologia se dissemine com uma velocidade muito maior dentro dos próximos anos.

Outro fator que ainda impede um alcance global ainda maior da tecnologia são as legislações governamentais locais e as regras de negócio das operadoras das redes elétricas, pois ainda nem todas não aderiram à possibilidade de revender a energia elétrica regenerada para as redes, seja por motivos burocráticos ou por motivos de desconfiança da qualidade da energia retornada.

Entretanto, com o aumento do alcance da tecnologia, mais casos bem-sucedidos e a comprovação da qualidade da energia regenerada e da segurança do sistema, as companhias e governos locais começarão progressivamente a reformular suas legislações e regras de negócio, bem como a reestruturar as suas redes elétricas para tornar possível a recepção e absorção ótima da energia recuperada pelos sistemas de regeneração energética.

Isto não se aplica somente ao campo do transporte elétrico sobre trilhos, e é algo que tendenciosamente será uma necessidade global em um futuro próximo para todos os segmentos existentes em uma sociedade. As necessidades energéticas aumentam a cada dia que passa, e soluções como o sistema INGEBER começarão de fato a integrar os sistemas já existentes em cidades.

A tecnologia INGEBER da Ingeteam é promissora, e já possui altas taxas de investimento e adesão, considerando o seu curto período de existência. É de se esperar que nos próximos anos vejamos uma implementação em larga escala dessa tecnologia em países, cidades e sistemas de transporte sobre trilhos diversos, o que certamente acarretará em um elevado impacto socioambiental em escala global no que diz respeito à redução do consumo energético e a companhia terá grandes chances de se consolidar como uma das pioneiras e líderes mundiais do setor econômico de regeneração energética.



## 9. CONCLUSÃO

A partir das experiências e dados abordados nesse artigo, consideramos a implementação de sistemas de recuperação de energia a partir da frenagem de trens como uma medida necessária a ser implementada em médio prazo a todas as linhas existentes. Eles geram amplos benefícios para um operador metroferroviário dadas as economias de energia geradas, diminuição do custo da energia, diminuição das emissões de poluentes, menos matéria para construção das subestações, entre outros.

Foi notado também que algumas marcas como a Alstom, Ingeber e Siemens comandam grande quantidade do mercado com produtos que estão em constante aprimoramento e evolução. Num mundo onde cada vez mais a visão ambiental e procura por fontes renováveis energéticas são necessárias, tanto as concessionárias quanto as empresas de tecnologia crescem e ganham grande importância no setor de transportes.

Os dados divulgados pelas empresas explicitam alguns casos em que as tecnologias não são justificadas economicamente ainda. Mas a tendência é de haver constantemente aperfeiçoamentos nas eficiências geradas, diminuição do número e tamanho dos equipamentos e demais aprimoramentos. Isso indica que no futuro, novas implementações se justifiquem aonde hoje ainda não são bem-sucedidas.

A postura imparcial existente no relatório do projeto *Ticket to Kyoto* evidencia que a tecnologia de Subestações Reversíveis é a que mais se destaca no seu segmento de mercado, e a tendência global é que as operadoras metroferroviárias cada vez mais enxerguem a necessidade de adotá-la em detrimento das demais tecnologias, frente à crescente demanda de redução de consumo e eficiência energéticas.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- TAKOEN, X.; DEVAUX, F. WP2B Energy Recovery: Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks. 2014.
- TAKOEN, X.; DEVAUX, F. WP2B Energy Recovery: Overview of braking energy recovery technologies in the public transport field. 2011.
- CPTM. Relatório da Administração 2013. Disponível em: <https://www.cptm.sp.gov.br/a-companhia/BalancosDemonstrativos/RelAdministrativo-2013.PDF>>. Acesso em 15/05/2016.
- UIC. Inverter unit for DC substations. Disponível em: <[http://www.railway-energy.org/static/Inverter\\_unit\\_for\\_DC\\_substations\\_47.php](http://www.railway-energy.org/static/Inverter_unit_for_DC_substations_47.php)>. Acesso em 29/05/2016.
- WOODFORD, C. Flywheels. Disponível em: <<http://www.explainthatstuff.com/flywheels.html>>. Acesso em 29/05/2016.
- Magneti Marelli S. p. A. Disponível em: <<https://www.magnetimarelli.com/pt/node/4979>>. Acesso em 22/05/2017.
- Sharma P. Journal of The International Association of Advanced Technology and Science Vol. 16, Reversible Substation in DC Traction. 2015.
- HESOP energy saver Longon Underground. Disponível em: <[http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure\\_2014/HESOP%20London%20Underground%20-%20Case%20Study%20-%20EN%20-%20LD.pdf?epslanguage=en-GB](http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure_2014/HESOP%20London%20Underground%20-%20Case%20Study%20-%20EN%20-%20LD.pdf?epslanguage=en-GB)>. Acesso em 22/05/2017.
- HESOP All-in-One Energy & Cost Saver. Disponível em: <[http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure\\_2014/HESOP%20-%20Product%20sheet%20-%20EN%20-%20LD.pdf?epslanguage=en-GB](http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure_2014/HESOP%20-%20Product%20sheet%20-%20EN%20-%20LD.pdf?epslanguage=en-GB)>. Acesso em 02/06/2017.
- Alstom Activity Report 2015/16. Disponível em: <[http://www.alstom.com/Global/Group/Resources/Documents/CSR/ALSTOM%20RA%20UK\\_FINAL-OK.pdf](http://www.alstom.com/Global/Group/Resources/Documents/CSR/ALSTOM%20RA%20UK_FINAL-OK.pdf)>. Acesso em 02/06/2017.
- INGEBER E01 - Energy Recovery Systems for Metro Bilbao. Disponível em: <<http://www.ingeteam.com/Download/254/attachment/sbp13-e01.pdf.aspx>>. Acesso em 06/06/2017.
- INGEBER E02 - Sistema de recuperación de energía para la línea C1, Málaga. Disponível em: <<http://www.ingeteam.com/Download/2059/attachment/sbp13-e02-malaga-cast.pdf.aspx>>. Acesso em 06/06/2017.
- INGEBER E03 - Energy Recovery Systems for Bielefeld Light-rail Network. Disponível em: <<http://www.ingeteam.com/Download/2268/attachment/ficha-eo3-bielefel-german.pdf.aspx>>. Acesso em 07/06/2017.

- INGEBER E04 - Energy Recovery Systems for Brussels Metro. Disponible en <http://www.ingeteam.com/Download/1918/attachment/brussels-e04.pdf.aspx>
- Ortega. J. M. INGEBER SYSTEM FOR KINETIC ENERGY RECOVERY & METRO BILBAO EXPERIENCE - I RAIL TECHNOLOGICAL FORUM FOR INTERNATIONALIZATION. 2011.
- Romo A. REVERSIBLE SUBSTATION IN HEAVY RAIL – ENERGY RECOVERY WORKSHOP - September 2015, Madrid, R&D Manager - Practical Cases
- Ingeteam Power Technology - Traction: INGEBER: Un sistema de recuperación de energía para el sector ferroviario (customer presentation, feb/2017).