



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRE DOS SANTOS LIMA

NOVA CONCEPÇÃO DE BARRAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA COM
TENSÃO VARIÁVEL PARA USO INDUSTRIAL

FORTALEZA – CE

2022

ANDRE DOS SANTOS LIMA

NOVA CONCEPÇÃO DE BARRAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA COM
TENSÃO VARIÁVEL PARA USO INDUSTRIAL

Defesa de tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica de Potência.

Orientador: Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD e co-orientador pelo Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Jr.

FORTALEZA – CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L696n Lima, André dos Santos.

Nova concepção de barramento em corrente contínua com tensão variável para uso industrial / André dos Santos Lima. – 2022.

109 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

Coorientação: Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Junior.

1. Barramento em corrente contínua.
2. Barramento com tensão variável.
3. Recuperação de Energia.
4. Eficiência Energética.
5. Supercapacitores. I. Título.

CDD 621.3

ANDRE DOS SANTOS LIMA

NOVA CONCEPÇÃO DE BARRAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA COM
TENSÃO VARIÁVEL PARA USO INDUSTRIAL

Defesa de tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica de Potência.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernando Luiz Marcelo Antunes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici (PPGEE-UFC)

Prof. Edilson Mineiro Sá Jr. (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE Sobral

Prof. Dr. Marcus Rogério de Castro
Universidade Federal do Ceará – Campus Sobral

Prof. Dr. Kleber César Alves de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE Sobral

Prof. Dr.-Ing. Sergio Daher
Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici

Prof. Dr. Cícero Marcos Tavares Cruz
Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici

Aos meus filhos, Amanda e Levi, e à minha esposa Andréa.

Aos meus pais Aurilo e Ângela (in memoriam), e meus irmãos, Denise, Fernando e Sérgio.

Aos meus tios e primos.

Ao meu Orientador Fernando Luiz M. Antunes, e ao meu co-orientador

Edilson Mineiro Sá Jr. pelo suporte imprescindível.

E a todos que participaram direta ou indiretamente, eu dedico este trabalho.

“O pessimista queixa-se do vento, o otimista espera que ele mude e o realista ajusta as velas.”

Willian George Ward

RESUMO

Embora os barramentos em corrente alternada ainda sejam os mais utilizados em aplicações de distribuição e transmissão de energia elétrica os barramentos em corrente contínua vêm ampliando a sua utilização. Com a evolução da eletrônica de potência esses barramentos CC têm ganhado espaço na aplicação em residências, datacenters e instalações telecomunicações. Com a utilização de fontes renováveis para produção de energia elétrica cresceu a demanda por estudos em corrente contínua de onde nasceram as microrredes em CC, ou MRCCs, que passaram a chamar atenção pela facilidade de integração dessas fontes de energia elétrica, e de sistemas de armazenamento de energia. Porém, na indústria esse movimento em torno das redes ou barramentos em corrente contínua é incipiente. Neste contexto este trabalho propõe uma nova concepção de barramento em corrente contínua com magnitude de tensão variável para aplicação em ambiente industrial visando o uso eficiente da energia elétrica. Um banco de capacitores foi dimensionado, e conectado diretamente ao barramento CC como fonte de armazenamento de energia, capaz de armazenar a energia cinética que seria desperdiçada nas frenagens dos motores elétricos. Além do estudo e proposição do barramento de tensão variável, foram realizados experimentos em laboratório, e em campo, numa máquina real de uma grande fábrica de calçados. Neste experimento na indústria o barramento de corrente contínua operou com tensão variável no intervalo de 530 V a 600 V alimentando uma máquina de injeção de PVC. Os resultados obtidos mostraram redução de até 5,05% no consumo de energia durante o processo avaliado.

Palavras-chave — Barramento CC; Motor síncrono de ímã permanente PMSM; supercapacitor; recuperação da energia cinética; frenagem de motores; eficiência energética, injetora de plástico.

ABSTRACT

DC buses and microgrids have drawn significant attention from academia due to the ease of integration of distinct sources and energy storage systems. However, most research refers to the use of DC buses for residential, datacenter, and telecommunication applications rather than industries. Most processes are controlled by AC motor supplied by the AC grid. This requires the energy supplied to the motor be twice processed leading to energy waste. In this context, this work proposes a novel approach for DC microgrids applied to industrial plants. Differently from other applications mentioned the DC bus voltage presents variable magnitude, aiming at improving energy efficiency as it has been shown through simulation, experimental results in laboratory and in a real plant. To prove the new conception here proposed an industrial process of a real machine in a large-size shoe factory is used. The induction motors of polyvinyl chloride (PVC) injection machines are supplied through an inverter which DC bus varies in the range from 530 V to 600 V. A capacitor bank is properly designed and directly connected across the DC bus and is responsible for storing the energy that would be lost during motor brakes the process. Experimental tests were carried out also in laboratory. The obtained results show that the DC bus needs no rigid control of the voltage and a reduction of up to 5.05% in energy consumption obtained during the evaluated process.

Index Terms—Capacitor bank, DC microgrids, industry DC bus, kinetic energy recovery, variable DC Bus voltage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gerador CC de 100kW acoplado a máquina a vapor instalado por Edison na Pearl Street Station.....	3
Figura 2. Diagrama do sistema de balanceamento de tensão de Thury para linha de transmissão em CC.....	4
Figura 3. Diagrama básico de um sistema HVDC.....	6
Figura 4. a) Conversor rotativo de 1.500 kW visto a partir do lado CA. Projetado para uma saída de 440/480 e 550 VCC por mudanças de derivação a partir de uma fonte CA de 11 kV trifásica a 50Hz e com rotação de 500 RPM. b) Bancada de testes para o conversor rotativo de 2.500 kW, projetado para sistema com tensão de saída contínua de 100.000 Volts e conectado a um transformador de 36 fases.....	7
Figura 5. A esquerda Peter Cooper Hewitt segurando sua invenção e à direita uma válvula retificadora em funcionamento numa estação de rádio AM em Beromünster na Suíça	8
Figura 6. Uno Lamm olha para as válvulas retificadoras na estação de Gotland I na Suécia com tensão de 100kV e 20 MW de potência.	9
Figura 7. Conversões de energia nos barramentos em um data center	12
Figura 8. Barramento em corrente contínua bifásico.....	14
Figura 9. Desenvolvimento do barramento de 380Vdc no mundo.....	15
Figura 10. Comparativo de perdas nos cabos para diferentes valores de tensão em relação à 230 VCA.	16
Figura 11. Diagrama comparativo dos diâmetros de cabos para diferentes tensões na mesma potência.	17
Figura 12. Modelo de linha de ônibus urbano: a) linha sem supercapacitor b) Linha com supercapacitor.....	20
Figura 13. Caminhões híbridos trafegando pela Autobahn na Alemanha	21
Figura 14. Componentes de um carro elétrico e diagrama de blocos dos barramentos.....	22
Figura 15. Topologia típica de sistema híbrido de armazenamento de energia em um veículo elétrico.....	23
Figura 16. Topologia genérica de uma microrrede em corrente contínua mostrando as conversões de energia.	24
Figura 17. Proposição do barramento em corrente contínua com tensão variável e com sistema recuperação de energia.	26

Figura 18: Evolução dos motores elétricos	28
Figura 19 – Tipos de motores mais utilizados pela indústria.	30
Figura 20: Vista explodida do motor de indução trifásico	30
Figura 21: Motor de corrente alternada de ímã permanente	31
Figura 22: Modelo da máquina síncrona de ímãs permanentes	32
Figura 23: Modelo elétrico do motor síncrono de ímã permanente.....	33
Figura 24. Diagrama de um motor conectado a um inversor e a um sistema hidráulico.....	39
Figura 25. Controle do motor MSIP em uma máquina injetora de plástico.....	40
Figura 26. Variação da tensão no barramento CC e da velocidade do motor após a desaceleração do MSIP.....	48
Figura 27. Fluxo de potências em watts entre os motores e o barramento CC, motor 1 freando e motor 2 a plena carga.	49
Figura 28. Fluxo de potências com a desaceleração e aceleração do motor 1	50
Figura 29. Curva de potência em watts do motor 1 em desaceleração e tensão no barramento em volts	52
Figura 30. Curvas de potência dos motores e do SRE.	53
Figura 31. Curvas da tensão e fluxo de potência no SRE, sem resistência de conexão.....	54
Figura 32. Tensão no barramento CC [V] e fluxo de potência no SRE [W] com as resistências dos cabos adicionadas.	55
Figura 33: Topologia proposta de barramento em CC com tensão variável	58
Figura 34: Montagem dos equipamentos de medição na Injetora	59
Figura 35. Posição das ponteiras de corrente e tensão no inversor da injetora	60
Figura 36: Medidas de potência para um ciclo de injeção, em vermelho a potência na entrada principal e em azul as medições na entrada do conjunto motor/driver.....	61
Figura 37: Resultados experimentais tensão e corrente no barramento CC com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (2 s por div.).....	61
Figura 38: Resultados experimentais em um ciclo completo de injeção de componentes. Ch 1 (200 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}) e Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}). Base de tempo: (4 s por div.).....	62

Figura 39: Detalhe da primeira desaceleração do motor da GEK 180/S com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (200 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}) e Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).	63
Figura 40: Resultados experimentais em um ciclo completo de injeção de componentes. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (2 s por div.).	64
Figura 41: Desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem em F_2 . Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).	65
Figura 42: Detalhe da desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem em F_5 . Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).	65
Figura 43: Potência dissipada na primeira desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), e P_{rf} (5 kW por div. – vermelho) – potência no resistor de frenagem (P_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).	66
Figura 44: Segunda desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), e P_{rf} (5 kW por div. – vermelho) – potência no resistor de frenagem (P_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).	67
Figura 45: Esquemático do banco de capacitores.	69
Figura 46: Produção de rolos de papel com 10 m de largura e até 200 m de comprimento para indústria gráfica.	70
Figura 47: Banco de capacitores e instrumentos de medidas conectados a injetora. 1. Osciloscópio, 2. Ponteira de alta tensão, 3. Amplificador das ponteiras de corrente e 4. Banco de capacitores.	72

Figura 48: Medições de corrente e tensão em um ciclo completo de injeção de componentes. Sem o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (4 s por div.). 73

Figura 49: Detalhe da primeira desaceleração, F_1 , do motor sem o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.). 74

Figura 50: Medições de corrente e tensão em um ciclo completo de injeção de componentes. Com o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (4 s por div.). ... 75

Figura 51: Detalhe da primeira desaceleração, F_1 , do motor com o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.). 75

Figura 52: Comparativo da potência ativa (P_i) durante três ciclos de produção (Sem banco de capacitor – Curva vermelha); (Com banco de capacitor – Curva azul). 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes K_s e K_p para condutor de cobre.....	18
Tabela 2 – Parâmetros do motor síncrono de ímã permanente – MSIP utilizado na simulação	48
Tabela 3: Parâmetros dos motores utilizados no experimento na fábrica.	59
Tabela 4: Resumo de tensões e corrente, V_{bar} e I_{bar} , no barramento de corrente contínua ...	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSV	<i>Comma-separated values</i>
EDLC	<i>Electrochemical Double Layer Capacitor</i> – Capacitor Eletroquímico de Camada Dupla
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Agência de Energia Internacional
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> – Transistor Bipolar de Porta Isolada
MIT	Motor de Indução Trifásico
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> – Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-semicondutor
MRCC	Microrrede em Corrente Contínua
MSIP	Motor Síncrono de Ímã Permanente
PVC	Policloreto de Vinila
PWM	Modulação por Largura de Pulso
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motors</i> – Motor Síncrono de Ímã Permanente
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> – Fonte de energia sem interrupções
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i> – Comutação de tensão nula
ZCS	<i>Zero Current Switching</i> – Comutação de corrente nula
ZVT	<i>Zero Voltage Transition</i> – Transição em tensão nula

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Barramentos de corrente contínua - histórico.....	3
2.1	Sistemas de transmissão em corrente contínua em alta tensão.....	5
2.1.1	Conversores de corrente contínua de alta tensão.....	7
2.2	Barramento em corrente contínua em tensões mais baixas.....	10
2.2.1	Sistemas em corrente contínua em edifícios.....	12
2.2.2	 Barramentos de corrente contínua para transporte.....	20
2.2.3	Barramentos em corrente contínua em veículos elétricos.....	22
2.2.4	Microrredes em corrente contínua.....	23
2.3	Barramento em corrente contínua para indústria.....	25
2.3.1	Proposição do Barramento em corrente contínua com tensão variável e com sistema de recuperação de energia para uso industrial.....	25
2.4	Considerações finais do capítulo.....	27
3	Motores elétricos e inversores de frequência.....	28
3.1	Tipos de Motores mais comuns na indústria.....	28
3.1.1	Motores de Indução.....	29
3.1.2	Motor síncrono de ímã permanente - MSIP.....	31
3.2	Modelo matemático do motor síncrono de ímã permanente.....	32
3.3	Acionamento de motores de indução por inversores de frequência.....	35
3.3.1	Tipos básico dos inversores de frequência no acionamento de motores.....	36
3.3.2	Variação de velocidade em motores de indução.....	36
3.4	Considerações finais do capítulo.....	37
4	Recuperação da energia nos processos fabris: estudo de caso.....	39
4.1	Energia desperdiçada em processos na Industriais.....	40
4.1.1	Perdas elétricas.....	43

4.2	Simulações das trocas de energia entre motores e o barramento CC.....	47
4.2.1	Cenário I: com o motor em plena carga é comandada a parada	48
4.2.2	Cenário II: uso instantâneo da energia de um motor desacelerando.....	49
4.2.3	Cenário III: desaceleração e aceleração de um motor com o outro conectado.....	50
4.3	Dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia.....	50
4.3.1	Efeito da resistência dos condutores de conexão do SRE ao barramento CC.....	53
4.4	Considerações finais do capítulo.....	55
5	Proposta de barramento em corrente contínua com tensão variável e recuperação de energia para indústria.....	56
5.1	Nova concepção de barramento em corrente contínua com tensão variável e recuperação de energia.....	56
5.2	Estudo do barramento CC proposto no chão de fábrica.....	58
5.3	Capacitores ou supercapacitores no sistema de armazenamento de energia?	62
5.3.1	Cálculo do banco de capacitores do sistema de recuperação de energia	67
5.4	Considerações finais.....	70
6	Barramento de corrente contínua com tensão variável, resultados obtidos na indústria.....	71
6.1	Resultados experimentais obtidos com o barramento em corrente contínua de tensão variável: ganhos de energia no ambiente industrial.....	72
6.1.1	Medições com o banco de capacitores desconectado do barramento CC.	73
6.1.2	Medições feitas com a conexão do banco de capacitores ao barramento de corrente contínua.....	74
6.2	Considerações parciais	77
7	conclusão.....	78
8	trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
	ANEXO I.....	93

1 INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas o mercado de energia associado a fontes combustíveis fósseis vem sofrendo oscilações as quais fazem com que o preço do petróleo e seus derivados varie favorecendo a procura por outras fontes de energia. Porém, segundo o relatório da *International Energy Agency IEA*, em 2007 oitenta por cento da oferta energética global ainda era de fontes fósseis e com uma tendência prevista para 2030 de que o petróleo manterá uma participação de 35% da oferta energética mundial, o carvão mineral 22% e o gás natural 25%. Nessa perspectiva os 18 % restantes dessa matriz energética ficarão com as chamadas fontes renováveis, como a hidráulica, eólica, solar. Os avanços tecnológicos tanto na eletrônica quanto na eficiência energética geram um certo otimismo para o futuro, embora a entrada de novas tecnologias e energias sustentáveis na matriz energética dependam das políticas dos governos (IEA, 2018). Visando esse cenário, o consumo eficiente de energia se torna também um ponto de discussão efetivo, visto que, muito pode ser feito para otimização de recursos que já são utilizados (SUNTIO *et al.*, 2011; ZHANG, 2018). Muito tem sido feito na concepção de novas topologias de conversores e técnicas de controle para que perdas sejam minimizadas. Estes estudos nas diversas áreas da eletrônica têm sido fundamentais no desenvolvimento das energias renováveis, porém o transporte e a utilização destas energias geradas por diferentes métodos, ainda são feitos de maneira mais convencional (BERMANN, 2008).

Desde o final do século 19, milhares de estudos foram focados na eficiência e no aprimoramento dos barramentos em corrente alternada tanto na distribuição quanto na transmissão de energia. A construção de uma rede em corrente alternada se norteia na utilização de transformadores como elementos equiparação de potencial, dando a ela capacidade de adaptação à diferentes níveis de tensão com baixo custo e reduzida perda de energia (THEISEN, 2010). No entanto, após os anos 90 com a evolução da eletrônica de potência, ancorada pelo desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores, floresceram novos estudos com foco em barramentos de corrente contínua, bem verdade que a corrente contínua nunca havia deixado de existir, porém o custo só se justificava na transmissão de energia elétrica em grandes escalas e em altíssima tensão. Apesar do alto custo de implantação das redes em corrente contínua, muitos dos trabalhos acadêmicos rumaram para a criação de microrredes em corrente contínua, que, em conjunto com as energias renováveis eólica e solar alcançaram eficiência e robustez maiores que as redes de corrente alternada (AUGUSTINE; MISHRA; NARASAMMA, 2014; DRAGICEVIC *et al.*, 2014; MORSTYN; HREDZAK; AGELIDIS, 2015).

No ano de 2004, o Lawrence Berkeley Laboratory iniciou uma pesquisa em uma rede de corrente contínua em 380 V, na qual substituía o barramento de corrente alternada, nessa pesquisa foi verificado que as conversões de energia causavam perdas, e com a utilização de um barramento único em corrente contínua obtiveram um aumento de eficiência em 28% (BECKER; SONNENBERG, 2011).

Tradicionalmente o barramento em corrente alternada apresenta frequência e magnitude de tensão fixas para obter estabilidade. As mesmas regras se aplicam às tensões do barramento CC, que muitas vezes são assumidas como apresentando tensões constantes obtidas de conversores eletrônicos de potência. Esses barramentos também possuem um rígido controle de magnitude de tensão, com baixa ondulação (SHUAI *et al.*, 2018). Desde 2004, quando o Berkeley National Lab começou a trabalhar em barramentos CC para edifícios, os pesquisadores se concentraram na concepção de barramentos de tensão fixa com níveis distintos para aplicações específicas, como visto em (HAHASHI; MINO, 2012; LIN *et al.*, 2016; UMAMAHESWARARAO *et al.*, 2019).

Muitas aplicações industriais como elevadores, centros de usinagem, corte de madeira, embalagens, moldagem por injeção de plástico, prensas de conformação, empilhadeiras, robôs e costura exigem máquinas elétricas operando em regime intermitente e, em alguns casos, ciclos operacionais de curta duração. Com as frequentes acelerações e desacelerações, existe a possibilidade de recuperação de energia convertendo a energia cinética associada a tais processos de fabricação em energia elétrica.

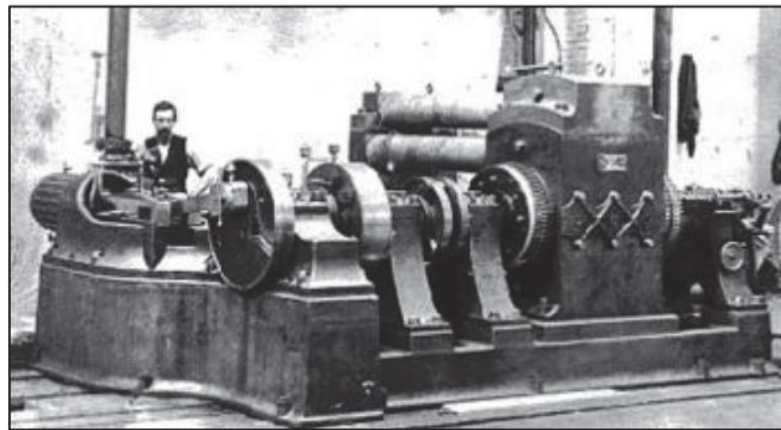
O processo de frenagem de um motor elétrico conectado a um driver pode causar variações na magnitude da tensão do link CC interno do conversor de potência. A recuperação de energia associada ao processo de frenagem foi amplamente estudada no contexto de veículos elétricos (VEs) em (QUEIROZ; POMILIO, 2017), assim como a otimização de ônibus CC em (YU; TAMURA; LORENZ, 2012), não tendo sido estudado para uso na indústria

Este trabalho propõe a utilização de um barramento CC, com magnitude de tensão variável, associado a um sistema de recuperação de energia, para aplicação industrial. O barramento em corrente contínua associado a um sistema de armazenamento visa diminuir eventuais conversões de energia elétrica e assim aumentar o rendimento do processo, uma vez que os motores de maior porte na indústria são alimentados por inversores que utilizam internamente a corrente contínua.

2 BARRAMENTOS DE CORRENTE CONTÍNUA - HISTÓRICO

As primeiras aplicações com energia elétrica começaram em corrente contínua, com os experimentos básicos de Galvani, Volta, Ampère e Ohm. O primeiro uso em larga escala da corrente contínua foram os telégrafos, e em seguida na iluminação, com as lâmpadas de arco de carbono alimentadas com corrente contínua fornecida por geradores em corrente contínua (CC) bobinados tipo série, depois, com as lâmpadas incandescentes de filamento de carbono, alimentadas em tensão constante por um gerador bobinado tipo paralelo. A primeira central elétrica foi construída por Thomas A. Edison em 1882 na Pearl Street em Nova York, utilizando máquinas a vapor como motriz primária dos geradores, mostrada na figura 1.

Figura 1. Gerador CC de 100kW acoplado a máquina a vapor instalado por Edison na Pearl Street Station.

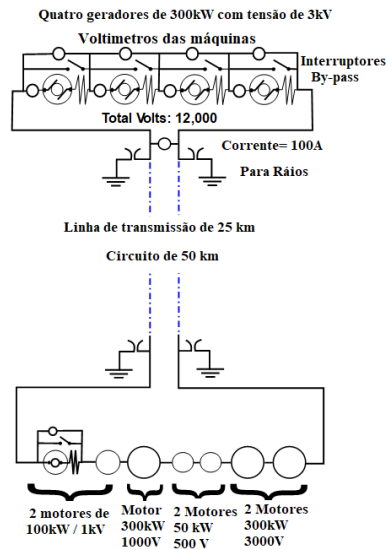


Fonte: (DE ANDRADE; DE LEAO, 2012)

Por volta da metade da década de 1880, os sistemas em corrente alternada (CA) começaram a competir com os sistemas em CC. Inventores como Nikola Tesla, William Stanley, Michael von Dolivo-Dobrowolsky, Elihu Thompson, Lucien Gaulard, John Gibbs, dentre outros, trabalhavam na Europa e na América do Norte desenvolvendo os sistemas em corrente alternada.

Em 1889, René Thury desenvolveu o primeiro sistema comercial em alta tensão em corrente contínua na Europa, suprindo Genova na Itália a partir do rio Gorzente por turbinas hidráulicas, inicialmente com tensão de 6 kV, e depois atualizado para 14 kV com 630kW com uma distância de circuito de 120 km. O sistema era composto por geradores em série para atingir altas tensões demandadas para transmissão de energia. Quanto mais carga era adicionada ao sistema, outros geradores eram também adicionados para manter a tensão, como esquema mostrado na figura 2.

Figura 2. Diagrama do sistema de balanceamento de tensão de Thury para linha de transmissão em CC.



Fonte: Extraído do site Wikipedia.org

Ainda em 1889, a primeira transmissão de longa distância em corrente contínua nos Estados Unidos foi realizada pela Willamette Falls Station no Oregon, a qual foi destruída por uma enchente no ano seguinte. Esse evento pavimentou o caminho para primeira transmissão em corrente alternada quando a Willamette Falls Electric, em 1890, instalou experimentalmente os primeiros geradores em corrente alternada da Westinghouse. Em 1896 a primeira geração e transmissão em corrente alternada estava terminada em Niagara Falls utilizando equipamentos da Westinghouse.

No final do século XIX, uma “batalha” foi travada pelos cientistas da época para saber qual dos dois tipos de barramento de energia, CC ou CA, era o melhor. No fim, foi vencida pelo barramento de corrente alternada.

Muito do que se escreveu à época sobre a “guerras das correntes”, que na realidade foi mais um conflito midiático, e pouco influenciou para a escolha de qual tipo de barramento seria utilizado. A decisão final foi baseada em critérios técnicos, pois, devido à necessidade do transporte da energia gerada em grandes distâncias, seria imprescindível o uso de altas tensões para reduzir as perdas ôhmicas. Além do mais, seria necessário a redução e compatibilização dos níveis de tensão para que pudessem ser utilizados com segurança, que foi conseguida com o uso de transformadores de tensão que haviam sido inventados em 1885 por três engenheiros eletricitas húngaros: Ottó Bláthy, Miksa Déri and Károly Zipernowsky.

Àquela época a tecnologia desenvolvida tornava o uso do barramento de corrente contínua inviável, pois não haveria meios de compatibilização dos níveis de tensão em corrente contínua, sem grandes perdas, de maneira fácil e barata, somente sendo possível com o uso de

complicadas máquinas rotativas (AILEE; TSCHUDI, 2012; FAIRLEY, 2012; THEISEN, 2010; THOMAS, 2010).

Nikola Tesla, com a invenção do motor de indução em 1888, contribuiu largamente com o barramento CA ao demonstrar os benefícios do uso do sistema de corrente alternada. Ele instalou, com o patrocínio de George Westinghouse, os primeiros geradores em corrente alternada na Willamette Falls Electric Company, iniciando assim, o declínio do barramento em corrente contínua. Embora a vitória do sistema em corrente alternada houvesse sido decretada, não foi completa. Muitos vestígios dos sistemas em CC continuaram a ser empregados em nichos: como nos telégrafos e sistemas de tração elétrica, por exemplo. Máquinas em corrente contínua eram mais utilizadas em sistemas de tração elétrica pelo fato de os motores CC terem um alto torque de partida e seu controle de velocidade realizado de forma mais simplificada. Além disso, algumas cidades ainda continuaram a utilizar o sistema em corrente contínua entrando no século 20. Na Europa, Helsinki utilizou um sistema CC até o final de 1940, Estocolmo utilizou esse sistema até a década de 70, Londres utilizou em certas cargas até o ano de 1981; e no ano de 2007, o último circuito em corrente contínua, vestígio do século 19 foi desligado na cidade de Nova York (DE ANDRADE; DE LEO, 2012). Apesar da larga utilização dos sistemas CA os pesquisadores nunca esqueceram as vantagens dos sistemas em corrente contínua e propuseram a utilização de sistemas de corrente contínua não como um substituto aos barramentos em corrente alternada, mas como complementar a esses sistemas. E dessa forma nasceu o sistema de transmissão em corrente contínua em alta tensão, *High Voltage Direct Current* (HVDC).

2.1 Sistemas de transmissão em corrente contínua em alta tensão

O cenário para os barramentos em corrente contínua no final do século 19, não era dos melhores. Apesar do domínio dos sistemas em corrente alternada, estudos continuaram a ser realizados em corrente contínua, passando a sistemas de alta tensão. Porém naquela época, existiam limitações com a tecnologia envolvendo essa empreitada.

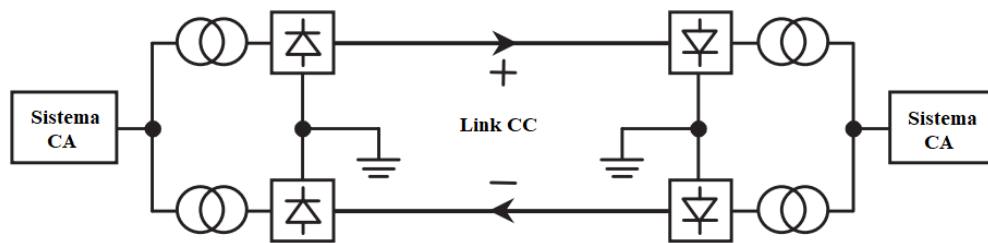
A integração dos sistemas em corrente alternada com os sistemas em corrente contínua só é possível com a utilização de conversores, assim uma pequena definição desse sistema se faz necessária.

Os sistemas em alta tensão em corrente contínua da sigla em inglês HVDC são compostos por quatro partes principais, listadas a seguir, conforme mostrado na figura 3:

- os transformadores, responsáveis por compatibilizar a magnitude da tensão alternada em tensões que possam ser utilizadas pelos conversores;

- os conversores que são dispositivos que promovem a conexão entre os sistemas CA e CC. Esses conversores são basicamente um circuito que através de interruptores controlados comuta as diferentes fases do sistema de corrente alternada com o sistema de corrente contínua enquanto as fases variam. No sistema HVDC é necessário um conversor na transmissão, chamado de retificador, e outro na recepção do sistema, chamado inversor;
- os condutores, cabos necessários para conduzir a energia elétrica. Os sistemas podem ser classificados de acordo com o número de condutores: monopolar, com apenas um condutor usualmente é utilizado o neutro enquanto o positivo é aterrado; bipolar, com dois condutores, sendo um negativo e outro positivo e o sistema homopolar, com dois ou mais condutores.
- Proteção e controle que tem como função o gerenciamento dos níveis de tensão corrente, frequência e fluxo de potência entre os sistemas CA e CC.

Figura 3. Diagrama básico de um sistema HVDC.



Fonte: o autor baseado em (DE ANDRADE; DE LEAO, 2012)

A transmissão em alta tensão em corrente contínua tem diversas vantagens em relação à transmissão em corrente alternada, tais como:

- Maior capacidade de transmissão de energia por condutor equivalente e construção de linhas mais simples;
- Cada condutor pode operar como um circuito independente;
- Redução das perdas de transmissão e não há o efeito pelicular;
- Alta estabilidade;
- Não há problemas com reativos e regulação de tensão;
- Sem problemas causados pelo efeito Ferranti;
- Não há a necessidade de sincronismo;

Mas tem como desvantagens a operação dos conversores, que geram harmônicas no sistema CA, requerem grandes quantidades de potência reativa, além do fato de possuírem baixa

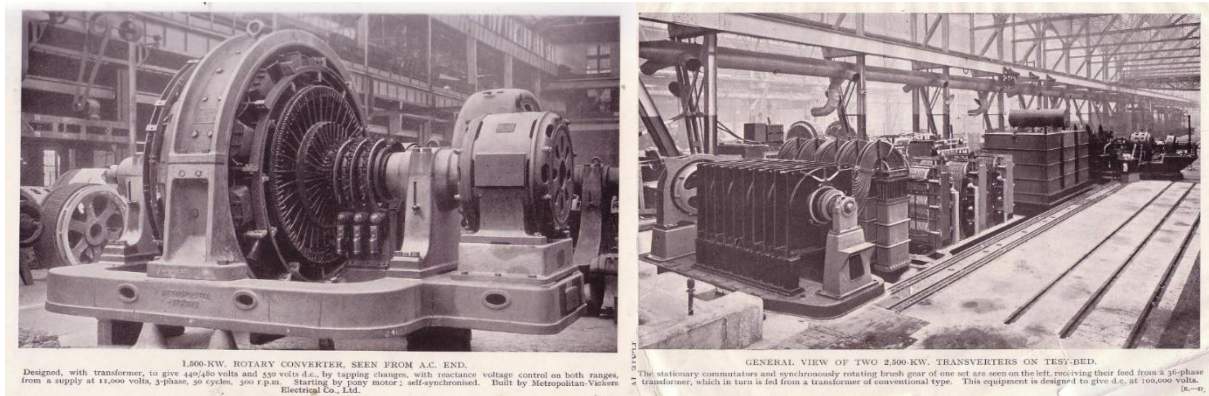
capacidade de sobrecarga. Assim, os conversores foram o maior problema para o desenvolvimento dos barramentos HVDC.

2.1.1 Conversores de corrente contínua de alta tensão

As primeiras tentativas de construir um conversor de tensão que pudesse operar em uma linha de transmissão em corrente contínua foram: o conversor transverter, ou conversor rotativo, o conversor eletrolítico líquido e o conversor de arco atmosférico.

O conversor transverter desenvolvido em 1920 por W. Highfield e J. Calverley era um interruptor eletromecânico que consistia em transformadores polifásicos comutados em sincronia por um comutador de escovas. Este dispositivo realizava três operações básicas da transformação da tensão, a multiplicação de fase, e a comutação. Podia ser tanto usado como retificador ou como inversor (CALVERLEY; HIGHFIELD, 1920). Muitos conversores transverters foram construídos e o maior deles operava com uma potência de 2 MW a 100 kV, mostrado na figura 4, nunca foi utilizado comercialmente.

Figura 4. a) Conversor rotativo de 1.500 kW visto a partir do lado CA. Projetado para uma saída de 440/480 e 550 VCC por mudanças de derivação a partir de uma fonte CA de 11 kV trifásica a 50Hz e com rotação de 500 RPM. b) Bancada de testes para o conversor rotativo de 2.500 kW, projetado para sistema com tensão de saída contínua de 100.000 Volts e conectado a um transformador de 36 fases.



Fonte: (BELSON, 2007)

O retificador eletrolítico, ou retificador líquido, foi patenteado por Glenn W. Carpenter em 1928 (CARPENTER, 1928). Este retificador era baseado em um processo eletroquímico onde dois diferentes metais eram suspensos em uma solução eletrolítica. A corrente fluía, pela solução, no sentido de menor resistência que o outro, realizando uma retificação. Apesar de várias tentativas esse dispositivo não foi produzido para altas tensões. O conceito em utilizar um líquido criava problemas de risco de choque, além de uma baixa tensão de ruptura voltagem.

O conversor de arco atmosférico idealizado por Erwin Marx e Herbert Bushwald em 1932, era um dispositivo de chaveamento em que um arco elétrico entre dois eletrodos

resfriados a água era iniciado por uma faísca de alta frequência entre os eletrodos auxiliares no caminho do arco principal, e se extinguía com um sopro de ar contínuo no caminho do arco zerando a corrente. Uma linha de 5 km usando o conversor de arco atmosférico foi implementada com sucesso na Alemanha operando com $\pm 40\text{kV}$ e 16 MW. O maior problema com esse conversor era o consumo os eletrodos que deviam ser trocados continuamente.

Então, trinta anos após do trabalho de Peter Cooper Hewitt de 1903, em um dispositivo retificador chamado de *Directional Current Arrester* (HEWITT, 1903) a válvula de arco mercúrio primitiva, Uno Lamm desenvolveu em 1933 uma válvula de arco-mercúrio que foi a primeira tecnologia de conversor aplicada comercialmente em alta tensão. A válvula de arco de mercúrio consistia em uma câmara de vácuo contendo uma pequena quantidade de mercúrio no fundo formando catodo do dispositivo. O anodo era feito de uma haste de carbono no topo da câmara formando o eletrodo. Quando o mercúrio era aquecido o vapor de mercúrio criado a uma baixa pressão podia ser ionizado por uma corrente elétrica criando um arco elétrico entre o anodo e o catodo. O mercúrio nessa condição, emite uma grande quantidade de elétrons livres enquanto o carbono, mesmo aquecido, emite uma pouca quantidade de elétrons favorecendo a corrente seguir em um só sentido, do catodo para o anodo promovendo assim a retificação. As válvulas de mercúrio, mostradas na figura 5, foram utilizadas entre a década de 30 e meados da década de 70, quando os tiristores começaram rapidamente a substituir esses dispositivos.

Figura 5. A esquerda Peter Cooper Hewitt segurando sua invenção e à direita uma válvula retificadora em funcionamento numa estação de rádio AM em Beromünster na Suíça



Fonte: Adaptado pelo autor, extraído do site Wikipedia e (BRITANICA ENCYCLOPEDIA, [s. d.])

Uno Lamm é considerado o pai do HVDC pelo desenvolvimento comercial da válvula de arco de mercúrio em altas tensões, mostrada na figura 6, que conseqüentemente deu um salto tecnológico nas linhas de transmissão em alta tensão em corrente contínua.

Figura 6. Uno Lamm olha para as válvulas retificadoras na estação de Gotland I na Suécia com tensão de 100kV e 20 MW de potência.



Fonte: extraído do site da(ABB / HITACHI, [s. d.]

Com o advento dos semicondutores, a evolução dos conversores de potência passou do mundo eletroquímico para os dispositivos de estado sólido. Esses semicondutores foram primeiro desenvolvidos por engenheiros do Bell Telephone Laboratories, em 1948, por um grupo de pesquisadores liderados por William Shockely. Neste mesmo ano Robert Hall recebeu seu título de PhD. Em 1942 ele havia entrado como engenheiro de testes na General Electric e saído para o seu doutorado em física nuclear na Caltech em 1946. Voltando do doutorado entrou para um grupo de pesquisadores que já trabalhavam com diodos de germânio, onde desenvolveu processos de cristalização e descobriu novos métodos de fazer a junção dos materiais semicondutores antes da criação do tiristor. Em 1956 o primeiro tiristor comercial foi lançado pela General Electric, mas apenas em meados dos anos 70, apareceram os primeiros tiristores para aplicações em alta tensão, que rapidamente substituíram as válvulas de mercúrio. Para utilização dos tiristores em HVDC diversos dispositivos são colocados em configurações série-paralelo para atingir a corrente e tensão necessária à aplicação. Em 1986 foi inaugurada no Brasil a hidrelétrica de Itaipú com uma linha de ± 600 kV com uma linha de transmissão até São Paulo de 785 km com potência de 3150 MW.

Os retificadores a tiristores estão sendo utilizados desde 1975, mas desde o início dos anos 2000 vem sendo substituídos pelos *Insulated-Gate Bipolar Transistors* - IGBTs. A utilização destes transistores no lugar dos tiristores não é uma ruptura de tecnologia como aconteceu com as válvulas, mas leva ao desenvolvimento de topologias de conversores antes tecnologicamente não possíveis. O primeiro uso dos IGBTs em HVDC foi em 2000 na Austrália, em um projeto chamado Directlink construído pela ABB, utilizando um cabo subterrâneo de 59 km, com potência 180 MW a uma tensão de ± 80 kV (WATSON; WATSON, 2020).

Tabela 1. Transmissão em alta tensão em corrente contínua do primeiro link até os dias de hoje. As potências e tensões são relacionadas ao projeto original sem contar com as expansões adicionadas.

Nome do Projeto	Localização	Ano	Características		
			MW	kV	km
Gotland	Suécia	1954	20	±100	96
Volgograd-Donbass	Rússia	1962	720	±400	473
N. Z. Inter Island	Nova Zelândia	1965	600	±250	609
Sardínia	Itália	1967	200	200	413
Pacific Intertie	Estados Unidos	1970	1440	±400	1362
Nelson River	Canadá	1973	1854	±463	890
Cahora-Bassa	Moçambique-Joanesburgo	1975	1920	±533	1456
Hokkaido-Honshu	Japão	1979	300	250	167
Itaipu	Brasil	1986	3150	±600	785
Quebec-N. England	Canada – Estados Unidos	1990	2250	±450	1500
Directlink	Austrália	2000	180	±80	59
East-South Intercon.	Índia	2003	2000	±500	1450
Celilo	Estados Unidos	2004	3100	±400	1200
Norned	Noruega-Holanda	2008	700	±450	580
Yunnan-Guangdong	China	2010	5000	±800	1418
Xiangjiaba-Shanghai	China	2011	6400	800	2071
Rio Madeira	Brasil	2013	3150	±600	2500
Jinping-Sunan	China	2013	7600	±800	2090
Tres Amigas	Estados Unidos	2014	5000	300	-
North-East Agra	Índia	2015	6000	±800	1728
NorthConnect	Noruega-Reino Unido	2020	1400	-	711

Fonte: adaptado de (DE ANDRADE; DE LEO, 2012)

Novas tecnologias HVDC baseadas em conversores *Voltage Source Converters – VSC* e os novos cabos de polietileno extrudado estão tornando possível economicamente a instalação de sistemas de potências menores até 200 MW em distâncias de apenas 60Km (RUDERVALL; CHAPENTIER; RAGHUVeer SHARMA, 2000).

2.2 Barramento em corrente contínua em tensões mais baixas

Assim como acontece com os barramentos em corrente contínua de alta tensão substituindo os de corrente alternada, há uma tendência cada vez maior da utilização dos barramentos de corrente contínua em baixa tensão.

A difusão da eletrônica tem levado ao uso de corrente contínua em dispositivos costumeiramente alimentados em corrente alternada. Hoje em dia a maioria das cargas já são supridas com energia contínua, porém o fornecimento de energia é em corrente alternada

obrigando-se a fazer uma conversão de energia, além disso, deve haver uma compatibilização dos níveis de tensão.

Em aparelhos de ar-condicionado, por exemplo, a tecnologia *inverter* se utiliza de inversores de frequência na busca pela eficiência energética através do controle de velocidade dos motores. A variação de velocidade do motor associado ao compressor, faz com que a potência demandada por esse motor também varie continuamente enquanto procura do ponto ótimo de temperatura do ambiente a ser refrigerado (VIRIYAUTSAHAKUL *et al.*, 2016).

É fato que as energias renováveis estão se proliferando em virtude de fatores diversos; e este crescimento corrobora com um maior uso de barramentos em corrente contínua, pois na sua grande maioria utilizam pelo menos um barramento de corrente contínua. Na topologia mais utilizada na geração eólica, o gerador é uma máquina que gera em corrente alternada, que é convertida em corrente contínua e através de um inversor é conectado à rede em corrente alternada. Essa mudança de corrente alternada para corrente contínua é necessária para que haja adequação de frequência entre a geração e o que é injetado na rede. Além da energia eólica, a energia fotovoltaica é gerada em forma de corrente contínua e depois convertida em corrente alternada por inversores. Nesse cenário o uso de um barramento de distribuição contínua ou híbrido pode se tornar mais atrativo e eficiente (NEJABATKHAH; LI, 2015; SAEEDIFARD *et al.*, 2010).

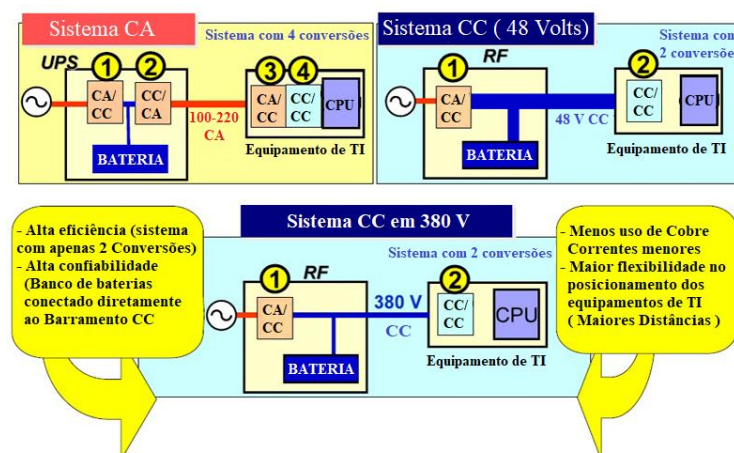
Os barramentos em corrente contínua em baixa tensão - LVDC já estão sendo estudados em sistemas elétricos de distribuição na Europa, com tensões mais altas que as utilizadas nos sistemas de distribuição em CA, sem, no entanto, sair dos níveis de tensão definidos da diretiva 2006/95/CE da comunidade europeia em que baixa tensão são os valores que compreendem a magnitude de tensão entre 50 V e 1000 V em corrente alternada e 75 e 1500 V em corrente contínua (PARLAMENTO EUROPEU, 2006). Com um barramento em corrente contínua é possível transferir mais potência que em um barramento em corrente alternada. As perdas são menores para os mesmos valores eficazes, pois na corrente contínua não há transferência de reativos. Os barramentos em corrente contínua ainda oferecem novas possibilidades à rede de distribuição, como por exemplo, a facilidade de conexão de sistemas de armazenamento e de geração distribuída. Usando sistemas de armazenamento de energia, é possível garantir o fornecimento de eletricidade aos clientes durante desligamentos das redes de alta tensão ou interrupções mais longas. Além disso, os conversores do sistema LVDC são capazes de reunir enormes quantidades de informações da rede de distribuição que facilitam o uso e o monitoramento da rede (HAKALA; LAHDEAHO; JARVENTAUSTA, 2015).

2.2.1 Sistemas em corrente contínua em edifícios

Devido ao crescimento do preço do cobre, os tradicionais sistemas em corrente contínua de 48 Volts utilizados em telecomunicações e data centers se tornaram caros de instalar e manter. Contudo, a tradicional distribuição em corrente alternada nessas instalações, necessitando de unidades de backup de energia com muitos estágios de conversão e equipamentos cada vez mais complexos, levavam a uma baixa eficiência energética, além da necessidade de caros sistemas de refrigeração para estes equipamentos. Por esses motivos, era necessária uma nova visão de como suprir essas cargas em corrente contínua tradicionalmente utilizadas em sistemas de telecomunicações com maior eficiência.

Em 2004, o Lawrence Berkeley National Laboratory - LBNL, iniciou uma investigação sobre a eficiência dos barramentos CC em edifícios de telecomunicações e de dados. Em 2005, iniciaram os estudos nos equipamentos *UPS - Uninterruptible Power Systems* e descobriram um baixo rendimento nessas fontes usadas por estabelecimentos de tecnologia da informação - TI. A partir desses estudos os pesquisadores do LBNL introduziram o conceito da redução do número de conversões energéticas nesses estabelecimentos. Como resultado, em 2006, foi apresentado em um evento em que a eficiência nesses ambientes melhorava em 28% quando se utilizava um barramento em corrente contínua em tensão mais alta de 380 V em corrente contínua (MOUSSA; GHORBAL; SLAMA-BELKHODJA, 2019; SAEEDIFARD *et al.*, 2010; TON; FORTENBURY; TSCHUDI, 2008). Essas conversões entre os diferentes barramentos em um data center podem ser vistas na figura 7, com ênfase no barramento de 380 VCC.

Figura 7. Conversões de energia nos barramentos em um data center



Fonte: adaptado de (OLIVER, 2014)

Com o crescimento do número de datacenters os barramentos em corrente contínua estão ficando cada vez mais comuns, haja visto que as máquinas utilizadas, em sua maioria,

computadores utilizam tensões CC. A conversão de corrente alternada em corrente contínua ocasiona perdas que podem ser minimizadas. A utilização do barramento CC neste caso é mais econômica e eficiente (BECKER; SONNENBERG, 2011; BODI; LIM, 2011; ELSAYED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015; GEARY, 2015; SURYANARAYANA; SUDHOFF, 2017).

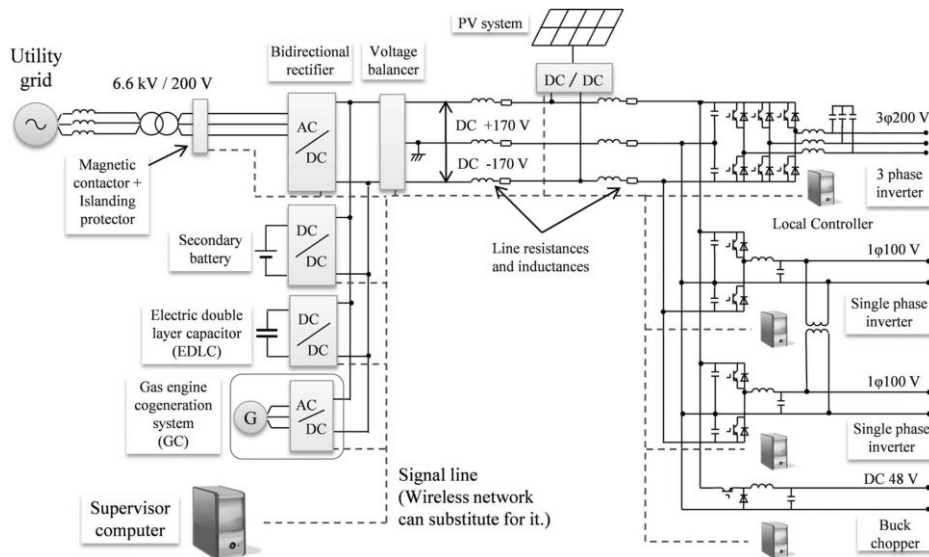
(KAKIGANO; MIURA; ISE, 2010) apresentaram um novo barramento, bifásico, em corrente contínua de baixa tensão e alta confiabilidade, mostrado na figura 8. Nesse trabalho os autores mostram os benefícios desse barramento de forma resumida como segue:

- A eficiência do sistema se torna mais alta pela redução das perdas de conversão entre as cargas CC e o barramento CA;
- Não é necessário considerar a sincronização entre o barramento e as cargas reativas;
- Quando ocorrem faltas no barramento CA não causam grandes perturbações no barramento CC porque o armazenamento de energia, com supercapacitores e baterias podem ser conectados diretamente nesse barramento.
- Por outro lado, existem alguns pontos em que a microrrede CC ainda deve ser mais estudada:
 - É necessário a construção de uma rede separada, muito embora possa ser utilizada toda a antiga infraestrutura.
 - A proteção de sistemas em corrente contínua é mais complexa que a de corrente alternada devido a não passagem por zero da tensão.
 - Certas cargas CA devem ser adaptadas ao barramento CC.

Nesse barramento, mostrado na figura 8, nota-se o uso direto de energia solar fotovoltaica e de outras fontes através de conversores CC-CC, e ainda o aparecimento de um neutro, já que este barramento é simétrico em 170 volts.

No sistema de distribuição em corrente contínua são normalmente utilizados dois fios, podendo ter três fios se o sistema fizer uso de barramento simétrico. Um ponto de neutro central, com a conexão de resistores de valor em milhares de ohms, é usado para a proteção contra falta para terra. Esse menor número de cabos é um dos atrativos para a instalação desse sistema, pois reduz custo em estrutura física de suporte e de condução de energia para uma mesma potência em corrente alternada. Ao contrário do barramento de corrente alternada, toda a potência circulante nesse sistema é útil, pois não existe defasagem entre tensão e corrente. Então, as perdas nesse tipo de sistema são somente pela condução nos materiais pelos quais circula a corrente.

Figura 8. Barramento em corrente contínua bifásico



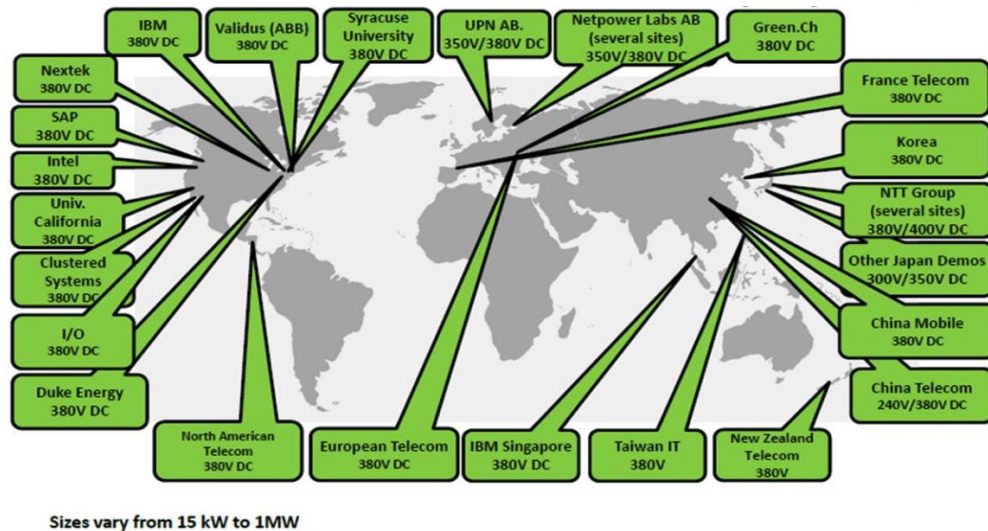
Fonte: (KAKIGANO; MIURA; ISE, 2010)

Esse menor número de cabos é um dos atrativos para a instalação desse sistema, pois reduz custo em estrutura física de suporte e de condução de energia para uma mesma potência em corrente alternada. Ao contrário do barramento de corrente alternada, toda a potência circulante nesse sistema é útil, pois não existe defasagem entre tensão e corrente. Então, as perdas nesse tipo de sistema são somente pela condução nos materiais pelos quais circula a corrente. Não há também perdas causadas pelos harmônicos. A filtragem destas frequências indesejadas que circulam pelo barramento é extremamente mais simples do que nos barramentos de corrente alternada, além de não haver nenhuma queda de tensão associada à frequência com estes filtros colocados ao longo da linha. Como a frequência do barramento é zero as interações causadas por impedâncias parasitas são mínimas (DRAGICEVIC *et al.*, 2016, 2015).

Um grande esforço tem sido feito para uma padronização deste barramento em corrente contínua dentro dos estabelecimentos de data centers e telecomunicações. Fabricantes e pesquisadores em conjunto têm delineado o que se julga melhor em termos de compatibilização entre eficiência, segurança e custo, sendo criado um grupo chamado EMerge Alliance. Esse grupo formado por grandes da indústria, tais como: General Electric, Philips, Silvania, ABB, Bosch, Samsung, Delta, Intel, Cisco entre outros, vem trabalhando na criação de padrões para aplicações comerciais, no que se concerne à segurança, padrões físicos e elétricos de equipamentos, e interfaces (DRAGICEVIC *et al.*, 2016, 2015; GEARY, 2015; RYU *et al.*, 2015).

Nesse sentido, muitos pesquisadores pelo mundo têm dado a sua contribuição no avanço do uso do barramento em corrente contínua, como pode ser visto na figura 9.

Figura 9. Desenvolvimento do barramento de 380Vdc no mundo

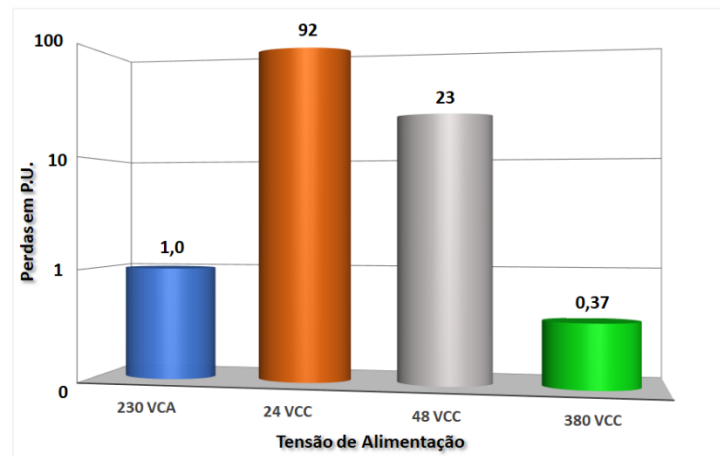


Fonte: extraído da apresentação “*Blinded by the light*” dC Fusion, llc

Por diversas razões têm-se levado a pensar em um novo barramento em corrente contínua com tensão mais alta para consumidores comuns (DRAGICEVIC *et al.*, 2016, 2015; OLIVER, 2014; RYU *et al.*, 2015). Estudos feitos por (CONG WANG; JAIN, 2014) mostram que a tensão de 380 VCC se torna mais eficiente e de menor custo que os 48 VCC tradicionais nos barramentos de telecomunicações, visto que os diâmetros dos cabos são bem menores, ainda que haja conversão de tensão em corrente contínua. Nesse mesmo estudo calcula que a eficiência total do sistema de distribuição em 380 VCC seja 4,88% mais eficiente que o tradicional barramento de 48 VCC.

Em um outro estudo comparativo, (WAFFENSCHMIDT, 2013) mostra a relação entre a perda ôhmica em valores por unidade (p.u) nos cabos elétricos e os níveis de tensão mais comuns em um data center, conforme pode ser visualizado na figura 10. Em outro trabalho realizado por (BECKER; SONNENBERG, 2011), há uma comparação dos níveis de corrente em uma carga controlada, inicialmente alimentada por uma tensão de 380 VCC e depois submetida a uma tensão de 230 VCA monofásica, na qual a corrente medida no barramento em corrente contínua é apenas 61% da corrente do barramento em corrente alternada, tendo como resultado, uma perda ôhmica por condução de 37% a mais nos 230 V em CA. Se com essa perda for assumida uma queda de tensão entre 1,5% e 3,0%, como sugerido na norma IEC 60364-5-52, leva o barramento de 380 V em CC a um ganho em eficiência entre 1 e 2 pontos percentuais.

Figura 10. Comparativo de perdas nos cabos para diferentes valores de tensão em relação à 230 VCA.

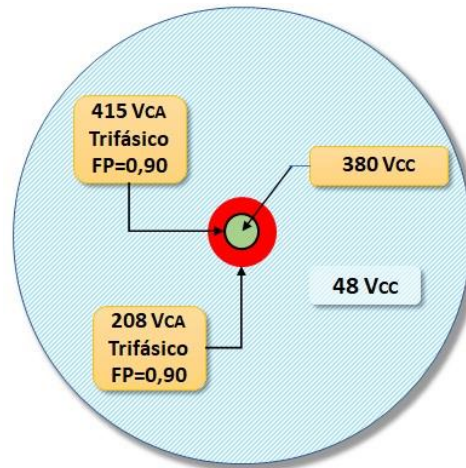


Fonte: o autor baseado em (WAFFENSCHMIDT, 2013)

Em seu trabalho (AILEE; TSCHUDI, 2012) relatam a trajetória do uso da corrente contínua e desmitificam alguns dos principais percalços no seu uso, e que persistem por várias décadas. Desde a década de 60, quando da criação dos primeiros dispositivos semicondutores, que o uso da eletrônica vem dominando os equipamentos elétricos de um modo geral. O avanço da tecnologia nesses materiais semicondutores, proporcionando o aumento substancial nos níveis de tensão, corrente e temperatura de operação fez com que fossem empregados cada vez mais em situações com exigência de altas potências, inclusive em linhas de muito alta tensão, acima de 500 kV. A utilização desses dispositivos semicondutores, que tem como característica a unidirecionalidade da corrente, excetuando alguns dispositivos no qual a bidirecionalidade é conseguida por arranjo interno próprio, fez com que aumentasse significativamente o uso de fontes em corrente contínua inclusive com a retificação de barramentos em corrente alternada. Além do mais, a grande maioria das fontes geradoras de energia renovável livre de carbono estão em corrente contínua, assim como o armazenamento.

Ainda no mesmo estudo, foi realizado um comparativo entre níveis de tensão em relação ao diâmetro dos cabos, considerando a mesma potência como parâmetro comparativo, visto na figura 11. A área central em verde, representa o diâmetro do condutor em um sistema em corrente contínua operando em 380 VCC, margeando esta área, em preto, um sistema em corrente alternada, trifásico, a 415 VCA com fator de potência 0,90. Em vermelho com um diâmetro um pouco maior, a representação de um cabo em um sistema em corrente alternada, trifásico, em 208 VCA com fator de potência 0,90 e por último o diâmetro do cabo para um sistema um sistema em 48 VCC, hachurada em azul.

Figura 11. Diagrama comparativo dos diâmetros de cabos para diferentes tensões na mesma potência.



Fonte: o autor baseado em (AILEE; TSCHUDI, 2012)

Os cálculos de diâmetro destes cabos foram baseados na IEC 60287-1 seção 2.1, considerando sua resistência CC e resistência CA, que são ligeiramente diferentes, uma vez que o valor CA sofre interferências da frequência da corrente que atravessa o cabo. Assim, a resistência CC é dada pela eq. (1).

$$R_{cc} = \frac{1,02 \times 10^6 \times \rho_{20}}{S} [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (1)$$

Onde:

R_{cc} é a resistência do condutor na temperatura de operação em (Ω/m);

S é a área seccional do cabo em mm^2 ;

ρ_{20} é a resistividade do material condutor a 20° Celsius em ($\Omega.m$);

α_{20} é o coeficiente de temperatura K do material condutor a 20° Celsius;

θ é a temperatura de operação do material condutor;

A resistência CA de um material condutor é dada correção da resistência CC para o efeito pelicular e o efeito de proximidade, sendo que o efeito de proximidade se considera a geometria do material condutor, que em um cabo tem seção circular. Assim temos na eq. (2) a resistência CA:

$$R_{ca} = R_{cc}(1 + y_s + y_p) \quad (2)$$

y_s é o efeito pelicular dado pela eq. (3);

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \quad (3)$$

Onde x_s^4 é:

$$x_s^4 = \left(\frac{8\pi f}{R_{cc}} K_s \times 10^{-7} \right)^2 \quad (4)$$

Sendo:

f a frequência da fonte;

R_{cc} a resistência do condutor na temperatura de operação em (Ω/m);

K_s constante que depende do tipo de fio ou cabo, ver tabela 1.

Tabela 1 – Constantes K_s e K_p para condutor de cobre

Tipo de condutor	Seco e impregnado?	K_s	K_p
Circular, filamentado	sim	1	0,8
Circular, filamentado	não	1	1
segmentado	-	0,435	0,37
Setorizado	sim	1	0,8
Setorizado	não	1	1

Fonte: o autor baseado na norma IEC 60287-1

O efeito de proximidade y_p depende da geometria de instalação dos cabos, para dois condutores de seção circular carregados temos a eq. (5).

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{S} \right)^2 \times 2,9 \quad (5)$$

E para três condutores carregados, o efeito de proximidade tem seu valor dado pela eq. (6).

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{S} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{S} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (6)$$

Onde x_p^4 é:

$$x_p^4 = \left(\frac{8\pi f}{R_{cc}} K_p \times 10^{-7} \right)^2 \quad (7)$$

Sendo:

f , a frequência da fonte;

R_{cc} , a resistência do condutor na temperatura de operação em (Ω/m);

K_p , constante que depende do tipo de fio ou cabo, ver tabela 1.

D_c , o diâmetro do condutor em mm

S , a distância entre os eixos dos condutores em mm

Na eq. (4) Nota-se que x_s deve ser menor ou igual a 2,8. E para condutores de secção transversal não circular o efeito de proximidade é de 2/3 dos valores calculados pelas equações acima sendo que:

d_c , passa a ser a área equivalente ao diâmetro da secção do condutor em mm;

$S=d_c + t$ onde t , é a espessura do isolante entre os condutores em mm.

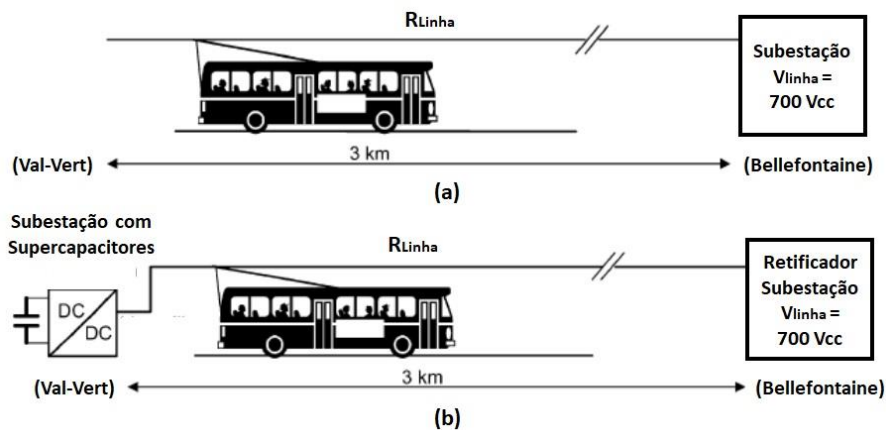
O uso da tensão em 380 VCC em edificações, se deve, em grande parte, porque este nível de tensão pode compartilhar da mesma infraestrutura já construída, pois os padrões de distribuição têm como valor máximo estabelecido em 420 VCA. Existem diversos mitos quanto ao uso do barramento em corrente contínua em tensões mais altas. O mais significativo deles refere-se quanto à segurança; 380 VCC é tão perigoso quanto tensões CA nas mesmas proporções. Padrões internacionais existem para garantir que os usos destes níveis de tensão, tanto CA quanto CC, sejam feitos de forma segura. Segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC), norma IEC 23E WG2, o barramento de 380 VCC distribuído de forma simétrica em ± 190 VCC é mais seguro que 208 VCA. Outro mito diz que os barramentos em corrente contínua exigem condutores de diâmetro maior. Essa afirmação não é correta se partirmos da mesma potência e nível de tensão. Quando se faz o cálculo de condutores leva-se somente em consideração a potência instalada e a tensão de trabalho, ou seja, é um valor CC. Vale salientar que no barramento em corrente contínua não há harmônicos nem perdas ocasionadas pelo fator de potência das cargas.

(GERBER; LIOU; BROWN, 2019) pesquisador do *Lawrence Berkeley National Labs* explica em seu trabalho, que embora haja um interesse na distribuição em CC nos edifícios comerciais, o mercado de cargas puramente contínuas ainda se mantém baixo. Em vários produtos testados em laboratório, embora fizessem o uso de corrente contínua, não haviam sido eficientemente projetados para corrente contínua. Nesse trabalho é mostrado quanto benefício pode se alcançar quando as cargas conectadas a um barramento de corrente contínua forem puramente em corrente contínua. Em outro trabalho mais recente. (GERBER *et al.*, 2021) trata do desenvolvimento de um modelo de medição informada para determinar a eficiência total em um edifício; para que projetistas tenham um padrão entre medições comparativas entre o barramento tradicional em CA e um barramento em CC.

2.2.2 Barramentos de corrente contínua para transporte

Outro uso já bastante comum da corrente contínua é feito por trens ou ônibus urbanos, onde uma linha é estendida ao longo do trajeto destes veículos para sua utilização, nesses casos a tensão, entre 600 e 700 volts, é mais alta para mitigar as perdas ôhmicas, como mostra figura 12 apresentado por (RUFER; HOTELLIER; BARRADE, 2004). Nesse modelo o supercapacitor está em uma ponta oposta à subestação.

Figura 12. Modelo de linha de ônibus urbano: a) linha sem supercapacitor b) Linha com supercapacitor



Fonte: o autor adaptado de (RUFER; HOTELLIER; BARRADE, 2004)

A desvantagem deste modelo é que as correntes tanto na partida quando na frenagem dos motores têm que percorrer todo o caminho da fonte ao veículo e vice-versa. Hoje em dia é mais comum que o banco de supercapacitores esteja dentro do próprio veículo. O correto dimensionamento dos elementos de armazenamento de energia é comum para que a tensão no barramento se torne mais estável possível. Com isso, o uso de supercapacitores tem sido largamente estudado. Estes supercapacitores funcionam como armazenadores de energia, próximo à unidade consumidora, fazendo com que a solicitação de picos de energia da fonte primária seja menor, otimizando o caminho percorrido pela corrente e melhorando o dimensionamento de todo o sistema (IANNUZZI; PIGHETTI; TRICOLI, 2010; STANA; BRAZIS, 2017; YAROSLAVTSEV, 2018).

Nos sistemas clássicos de transporte que utilizam corrente contínua a energia recuperada na frenagem pode ser reutilizada por outros veículos, na falta de veículos sendo acelerados esta energia é dissipada em resistores de frenagem. Para evitar a perda desta energia, sistemas com supercapacitores têm se tornado bem populares e tanto o seu

dimensionamento quanto o controle da energia armazenada vem sendo caso de estudo (BARTLOMIEJCZYK; MIRCHEVSKI, 2014; HIJAZI *et al.*, 2015; QUEIROZ; POMILIO, 2017).

Em 2016 a Siemens construiu a primeira linha a qual chamou de *eHighway* em corrente contínua para a alimentação de caminhões de transporte na Suécia. O percurso de testes tinha dois quilômetros de extensão. Já em 2017, construiu outra *eHighway* no estado de Hessen, na Alemanha, entre Weitersdadt e Frankfurt, em uma rodovia pública a *autobahn* A5. Segundo a empresa esse sistema já está disponível para implantação comercial. A *eHighway* funciona fornecendo 670 volts em CC para os “pantógrafos” ou hastes condutoras de um caminhão, como o mostrado na figura 13. O sistema só funciona em velocidades inferiores a 90 km/h com completa mobilidade. Durante o uso, o veículo híbrido pode funcionar inteiramente com seu motor elétrico enquanto carrega sua bateria simultaneamente. E no final do segmento eletrificado da estrada, o caminhão pode continuar como elétrico utilizando suas baterias, mudando para o motor a diesel apenas quando estiverem totalmente esgotadas.

A proposta é reduzir a utilização de combustíveis fósseis. *The World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) estima que o frete global triplicará o volume entre 2000 e 2050 e apenas cerca de um terço deste adicional de volume pode ser enviado por via férrea. Como resultado, as emissões de CO₂ do frete de caminhão deverão dobrar até 2050 (SIEMENS MOBILITY GMBH, 2019).

Figura 13. Caminhões híbridos trafegando pela Autobahn na Alemanha

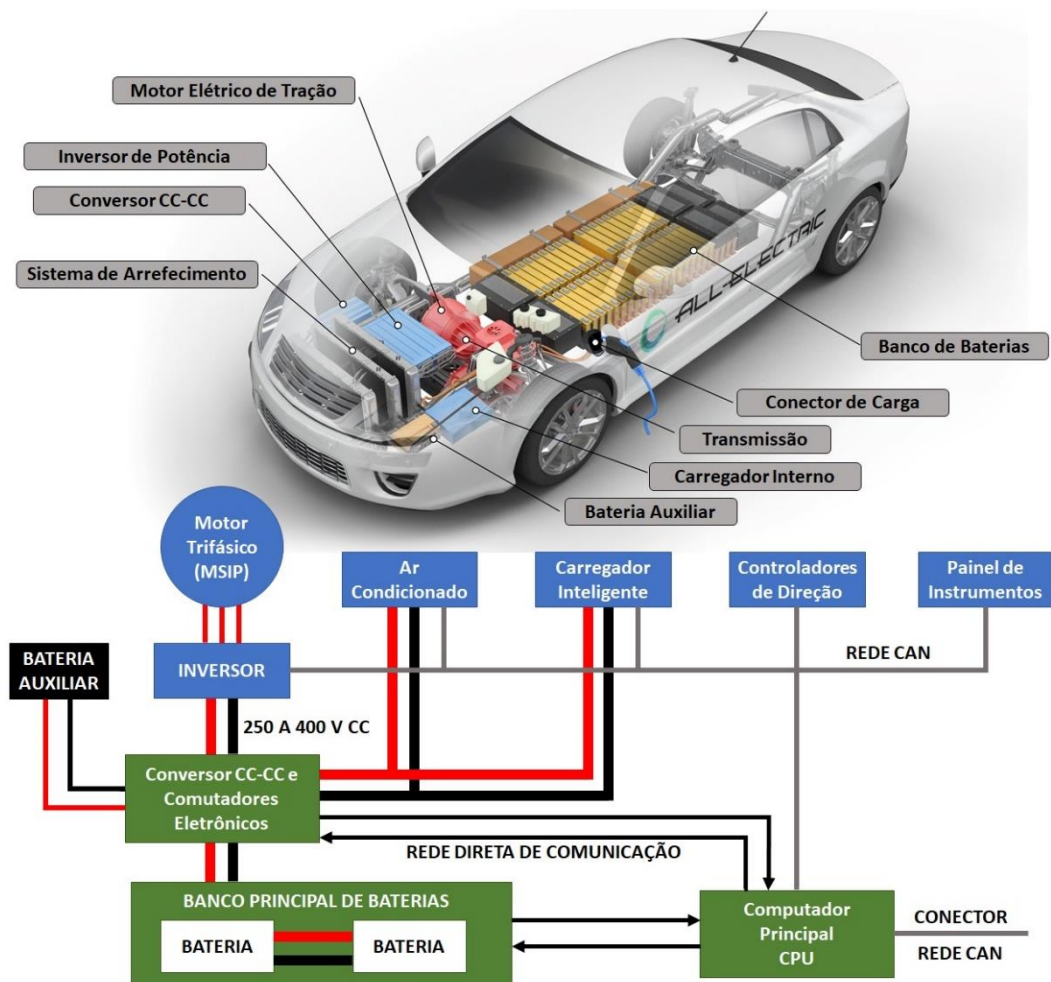


Fonte: extraído do site www.siemens.com/press/ehighway

2.2.3 Barramentos em corrente contínua em veículos elétricos

Muitas montadoras de veículos estão anunciando que deixarão a produção de veículos a combustão em detrimento aos veículos com mobilidade elétrica até 2035, e que os preços dos carros elétricos ficarão menores que os de combustão a partir de 2027 (MCKERRACHER *et al.*, 2021). A figura 14 mostra o diagrama de um veículo elétrico. Esses veículos utilizam um barramento principal em corrente contínua em tensões de 250 a 400 V, que tem como característica a possibilidade de absorver a energia desperdiçada nas frenagens com sistemas apropriados. Os sistemas de recuperação de energia, *ERS – Energy Recovery Systems* em inglês, aumentam a autonomia do veículo, recuperando a energia que seria desperdiçada na frenagem para o banco de baterias principal, ou a um conjunto de supercapacitores (QUEIROZ; POMILIO, 2017).

Figura 14. Componentes de um carro elétrico e diagrama de blocos dos barramentos.



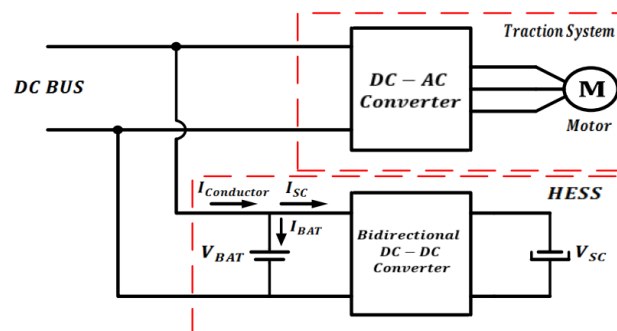
Fonte: o autor adaptado de imagem do site afdc.energy.gov.

Nesse aspecto a forma de como a integração de motores a esse barramento de corrente contínua é feita tem um grande impacto na sua implementação. A utilização de sistemas de armazenamento de energia utilizando supercapacitores conectados diretamente ao barramento em corrente contínua pode a ser mais viável, pois estes dispositivos têm como grande vantagem a entrega de altas quantidades de energia de forma mais rápida que sistemas com baterias e a redução do número de conversões de energia diminui as perdas (QUEIROZ; POMILIO, 2017).

Na utilização de sistemas de recuperação de energia com capacitores ou supercapacitores, grandes quantidades energia deverão absorvidas e descarregadas quase instantaneamente, e a utilização de conversores com alta eficiência se faz necessário para a mitigação de perdas. Estes conversores têm que ser capazes de transferir energia bidireccionalmente, além de compatibilizar os níveis de tensão (ABDULLAH *et al.*, 2013; WEI *et al.*, 2018).

Em veículos elétricos sistemas de armazenamento de energia são indispensáveis ao seu funcionamento e a utilização de supercapacitores concomitante a sua fonte primária de energia vem crescendo por suas características que melhoram a eficiência do conjunto motor. Esses sistemas híbridos de armazenagem de energia chamados HESS (Hybrid Energy Storage System) utilizam um conversor CC-CC bidirecional para conectar os supercapacitores ao sistema primário de energia, conforme mostra a figura 15.

Figura 15. Topologia típica de sistema híbrido de armazenamento de energia em um veículo elétrico



Fonte: (BRODAY *et al.*, 2015)

2.2.4 Microrredes em corrente contínua

Em (LASSETER, 2001) definia o conceito moderno de uma microrrede como: “*é um cluster de microfontes, sistemas de armazenamento e cargas que se apresentam à rede como uma entidade única que pode responder aos sinais de controle central. O coração do conceito de microrrede é a noção de uma interface flexível, mas controlável, entre a microrrede e o sistema de energia mais amplo. Essa interface essencialmente isola os dois lados eletricamente*

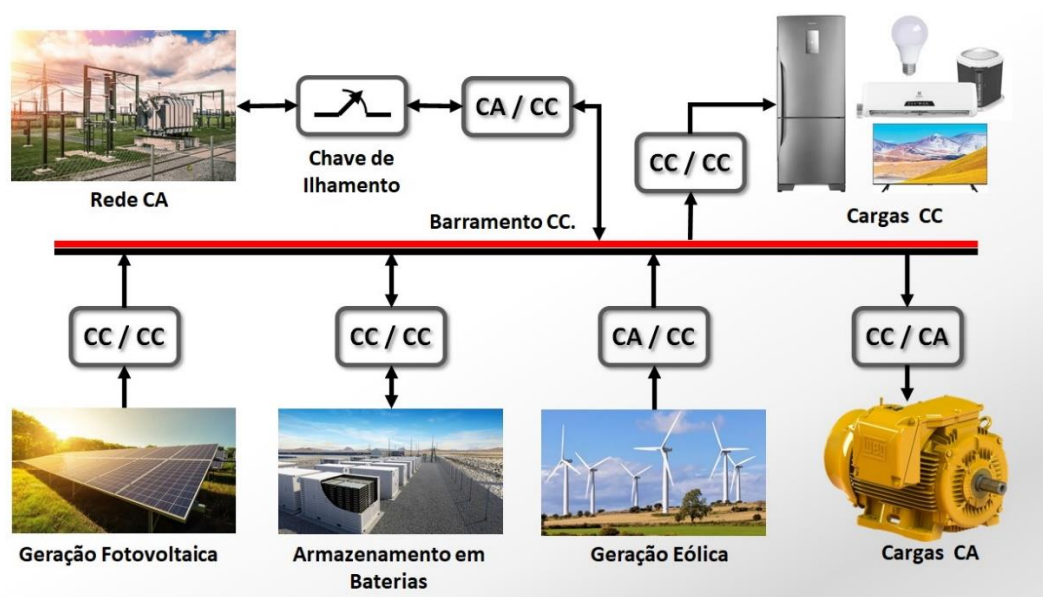
e ainda os conecta economicamente. No interior, as condições e a qualidade do serviço são determinadas pela microrrede, enquanto os fluxos através da linha divisória são motivados pela prevaiente necessidade do sistema de transmissão”.

À época se falava em microrredes em corrente alternada, no entanto com o crescimento das energias renováveis, principalmente da fotovoltaica e a uso cada vez mais frequente de barramentos em corrente contínua na microgeração eólica, para intercambiar diferentes fontes primárias em corrente alternada através de conversores eletrônicos, surgiram as microrredes em corrente contínua.

A microrrede em corrente contínua cria a possibilidade de conexão direta ao barramento em corrente contínua com uma menor quantidade de conversões de energia facilitando tanto na utilização de conversores mais simples quanto conversores mais eficientes, criando uma rede de distribuição mais confiável (DRAGICEVIC *et al.*, 2015).

A microrrede CC mostrada na figura 16 é o estágio primário das futuras redes inteligentes. As fontes de geração de energia distribuída são compostas por diferentes tecnologias: como energia eólica, energia das ondas ou marés, célula de combustível, energia solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, micro hidráulicas, estruturas de armazenamento de energia (célula de combustível de hidrogênio, volantes, baterias, supercapacitores, ar comprimido etc.), que estão conectados com redes compartilhadas perto da solicitação de carga. Na sua maioria são fontes que tem barramento em corrente contínua dessa forma uma microrrede em corrente contínua é preferível em detrimento a um de corrente alternada (MHANKALE; THORAT, 2018).

Figura 16. Topologia genérica de uma microrrede em corrente contínua mostrando as conversões de energia.



Fonte: o autor utilizando imagens do Google imagens.

2.3 Barramento em corrente contínua para indústria

Como foi visto ao longo desse capítulo, o barramento em corrente contínua não teve seu fim com a escolha do sistema em corrente alternada para a alimentação das cargas ao longo dos anos. A escolha pela corrente alternada foi técnica, pela melhor tecnologia de transferência de potência com menores perdas. Porém, com o passar dos anos e o massivo uso da eletrônica, as cargas efetivamente mudaram, e continuam mudando para serem em corrente contínua. Os barramentos em corrente alternada utilizam tradicionalmente para o funcionamento eficaz das máquinas elétricas a tensão e a frequência fixas, admitindo apenas uma mínima variação. Partindo-se dessa premissa, os estudos realizados com barramentos em corrente contínua, seguiram os mesmos passos tendo como premissa a tensão fixa (HAHASHI; MINO, 2012; LIN *et al.*, 2016; UMAMAHESWARARAO *et al.*, 2019).

A quebra do paradigma de qual o melhor sistema de energia, CC ou CA, ao que se concerne às perdas, iniciou-se com a pesquisa feita pelo *Lawrence Berkeley National Lab*, onde um estudo econômico provou que a mudança de corrente alternada para corrente contínua em edifícios comerciais e de telecom seria mais eficiente energeticamente (GERBER *et al.*, 2017, 2021; GERBER; LIOU; BROWN, 2019; VOSSOS *et al.*, 2018).

Entretanto, a grande maioria das pesquisas sobre barramento em corrente contínua referem-se às microrredes CC, edifícios comerciais e a ambientes domésticos, os chamados *Smart Homes*, deixando de fora a indústria de manufatura que é o maior consumidor de energia elétrica.

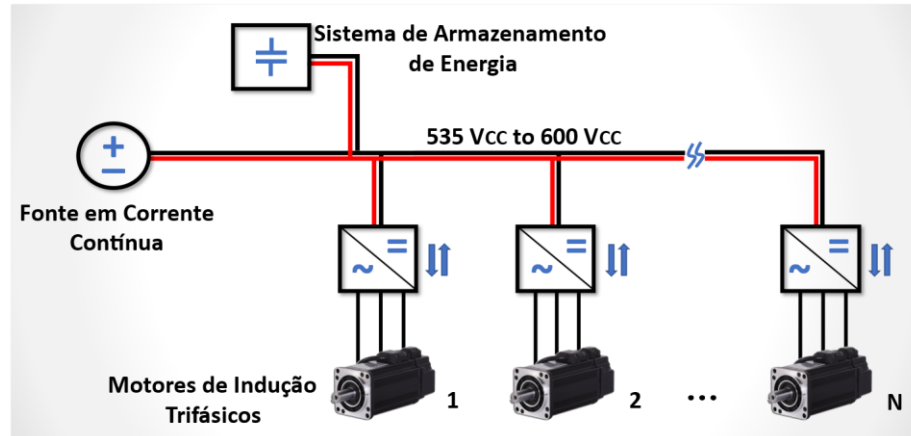
2.3.1 *Proposição do Barramento em corrente contínua com tensão variável e com sistema de recuperação de energia para uso industrial*

Como contribuição, esse trabalho propõe o uso de um barramento em corrente contínua com tensão variável com a possibilidade de recuperação de energia para a indústria de manufatura em substituição ao barramento de corrente alternada, como mostrado na figura 17.

Em muitas aplicações industriais como pontes rolantes, guindastes, máquinas de corte, injetoras de plástico, tornos, robôs, máquinas de costura, e muitos outros tipos, utilizam motores elétrico que são comumente alimentados em corrente alternada. No entanto, com novos processos de controle industrial, essas máquinas vêm sendo conectadas à rede elétrica através de conversores eletrônicos, seja para controle de velocidade, seja para a mitigação das altas correntes de partida. Esses conversores possuem internamente um barramento em corrente contínua proveniente de um retificador. Portanto, a utilização de um barramento em corrente

contínua como alimentador primário dispensaria a utilização do retificador desse conversor, reduzindo o número de conversões de energia. Além disso, há a possibilidade da recuperação e armazenamento de energia das frenagens das máquinas de forma mais simples e eficiente.

Figura 17. Proposição do barramento em corrente contínua com tensão variável e com sistema recuperação de energia.



Fonte: o autor

A energia cinética está associada às mudanças constantes de aceleração da força motriz, em um primeiro estágio no processo de manufatura, consomem energia com a aceleração para realizar um trabalho mecânico, e em um segundo estágio deve ser bruscamente desacelerado havendo o desperdício de energia (CARMELI *et al.*, 2013; GUEDES, Aderaldo R. *et al.*, 2017; KARATZAFERIS; TATAKIS; PAPANIKOLAOU, 2017).

Na proposição do barramento em corrente contínua para a indústria não somente a troca da corrente contínua por alternada será o caso do estudo, mas complementarmente a possibilidade desse barramento variar sua tensão quando houver a recuperação da energia não utilizada no processo industrial. Para este estudo, parte-se da premissa que a magnitude da tensão deverá seguir os padrões já existentes por questões de segurança. Dessa forma, a tensão deverá seguir um valor mínimo de tensão na fonte de corrente contínua de 535 Volts, valor próximo à valor de pico do barramento trifásico de 380 Volts CA retificado. Os valores máximos de tensão contínua são os permitidos pelos equipamentos existentes na própria infraestrutura da indústria, no caso, os inversores de frequência, para preservar uma operação segura sem a possibilidade de danos aos mesmos.

Nesse trabalho, para efeito de delimitação do estudo, não serão estudados metodologias ou conversores para criação do barramento em corrente contínua, bem como esses conversores interagem com uma rede de corrente alternada. O foco desse estudo é mostrar a viabilidade da aplicação na indústria de um barramento em corrente contínua com tensão

variável como alimentador primário, com ênfase nas trocas de energia entre os motores, o barramento e o sistema de recuperação de energia.

2.4 Considerações finais do capítulo

Embora a corrente alternada por muitos anos tenha sido o padrão no desenvolvimento de sistemas de distribuição de energia, a corrente contínua nunca deixou de ser utilizada. Nesse capítulo foi apresentado um histórico das redes em corrente contínua, tendo como início os barramentos de transmissão em corrente contínua em alta tensão, culminando com as novas topologias de distribuição em corrente contínua as microrredes CC. O aumento da utilização da eletrônica e a contínua busca em eficiência energética, direcionaram estudos em barramentos de corrente contínua, tanto para edificações de datacenters e de telecomunicações, como também, em sistemas motrizes dedicadas ao transporte.

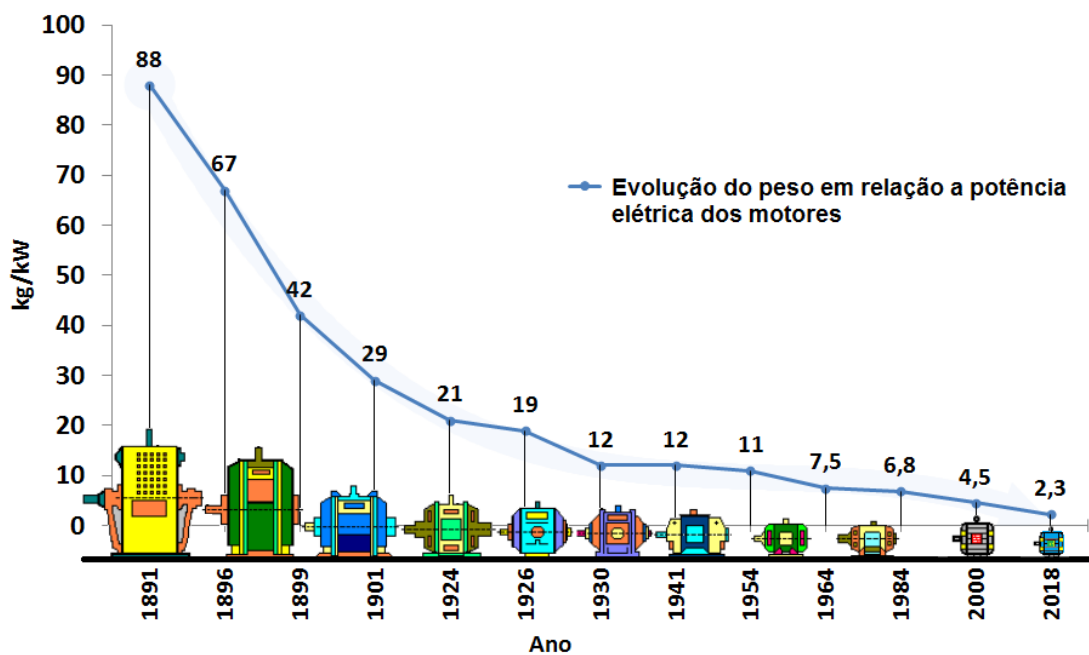
Finalizamos o capítulo com o cerne deste trabalho, que é a proposição da utilização de um barramento em corrente contínua com tensão variável e com recuperação de energia para utilização na indústria. Ao longo do estudo serão avaliadas as trocas de energia entre os motores conectados ao barramento e um sistema de recuperação de energia.

3 MOTORES ELÉTRICOS E INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Segundo (KERSLAKE; MAHMOUDI; KAHOURZADE, 2021; MARFOLI *et al.*, 2021), de toda demanda energia elétrica usada globalmente cerca de 50% é utilizada por motores elétricos. Ainda nesses estudos vê-se que a eficiência de um motor de 60 cv, 4 polos na década de 80 não passava de 90%, hoje os motores ultrapassam os 95% de eficiência o que tem efeito na redução da emissão de CO₂. A figura 18 mostra a evolução genérica peso vs. potência dos motores elétricos ao longo dos anos.

A maior parte a energia demandada na indústria é utilizada em motores elétricos. Em uma indústria de transformação onde a matéria prima é trabalhada para criar um produto utiliza motores elétricos como os transformadores e transportadores da matéria. A demanda de energia elétrica cresce a cada ano culminando com a necessidade de construção de novas unidades geradoras de energia.

Figura 18: Evolução dos motores elétricos



Fonte: adaptado do guia de motores elétricos (WEG, 2015)

3.1 Tipos de Motores mais comuns na indústria

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética no estudo Demanda de Energia – DEA 2050 (EPE, 2016), na indústria, a força motriz é responsável pelo maior consumo de energia,

em face a isso, para melhorar a eficiência destas máquinas muitas ações têm sido tomadas tanto por fabricantes de motores como por seus usuários.

Novas tecnologias em motores têm surgido no mercado e conseqüentemente entram em competição com tecnologia de motores de indução trifásica que já tem mais de 100 anos. Quando se fala de motores de indução trifásicos, praticamente 90% destas máquinas estão instaladas na indústria, pois sua alta eficiência, alto torque a um baixo custo garantem alta produtividade quando comparados a outras forças motrizes. além do mais, pequenos motores não necessitam mais que um simples interruptor para o seu acionamento (MURPHY, 2012; RAI; SEKSENA; THAKUR, 2017).

Na indústria, motores com potência acima de 5 cv conectados ao barramento de corrente alternada não devem ser acionados de forma direta, pois sua corrente de magnetização pode causar afundamentos de tensão, sendo necessário o uso de chaves comutadoras com partida suave ou inversores. Com o avanço da eletrônica, os inversores de frequência têm sido a opção mais comum nas indústrias e com diversas vantagens: o seu preço tem caído ficando próximo aos acionadores de partida suave, fator de potência unitário, dentre outras. A aplicação destes inversores torna mais fácil o uso de novas tecnologias de motores ainda mais eficazes.

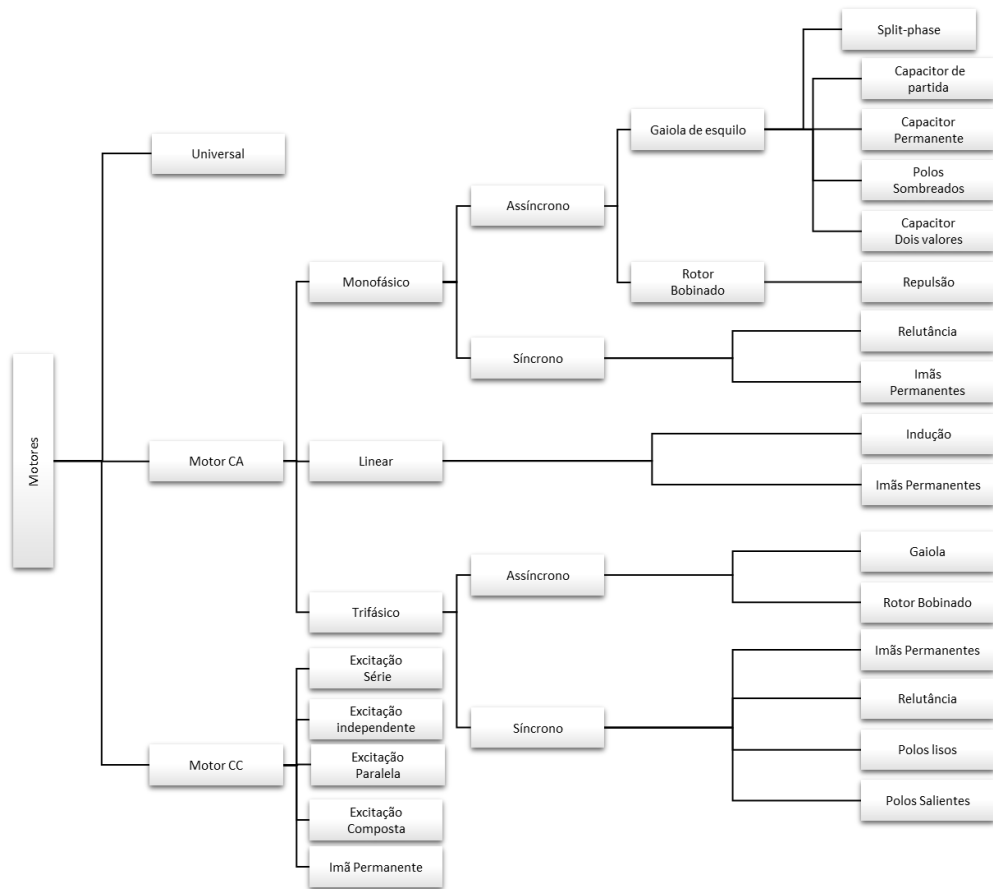
Das inúmeras tecnologias em máquinas rotativas a mais utilizada na indústria são os motores de indução trifásicos, porém, com o uso da eletrônica nos acionamentos motores de ímã permanente em corrente alternada vem ganhando espaço e há ainda um terceiro tipo, mas de aplicação específica que é o servo motor.

Os motores de indução trifásicos com rotor em gaiola são especificados no Brasil pela norma ABNT NBR 17094 em conjunto com a norma IEC 60034-1. A figura 19 mostra os tipos mais comuns de motores na indústria.

3.1.1 Motores de Indução

São os motores de mais fácil construção e mais comuns no mercado suas potências variam de frações indo até milhares de cavalo vapor (cv). Nesses motores um campo magnético girante é criado em seu estator quando conectado a uma fonte de energia elétrica. Esse campo girante induz a criação de uma corrente no rotor da máquina que por consequência cria outro campo em oposição ao campo do estator gerando assim um torque. O estator dessas máquinas são construídos com finas lâminas de aço silício com ranhuras e empilhadas suportadas por uma estrutura. Os enrolamentos deste estator são colocados nessas ranhuras, interconectados entre si para que sejam externamente acessados.

Figura 19 – Tipos de motores mais utilizados pela indústria.



Fonte: o autor, baseado no (WEG, 2015)

O rotor é construído com barras de cobre ou alumínio curto-circuitadas nas terminações com anéis do mesmo material. Essa construção fica incrustada em lâminas de aço silício como o estator. A forma desta construção lembra uma gaiola de esquilo, de onde vem o nome comum desta máquina (LAMME, 2013; MURPHY, 2012). A figura 20 mostra um motor de indução trifásico.

Figura 20: Vista explodida do motor de indução trifásico

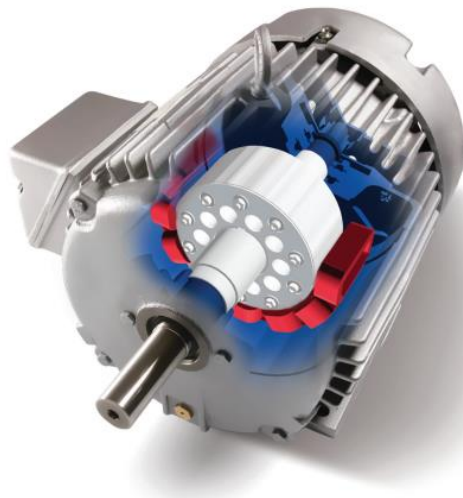


Fonte: (MURPHY, 2012)

3.1.2 Motor síncrono de imã permanente - MSIP

Os motores de corrente alternada com Imã permanente são máquinas síncronas que vêm aumentando sua participação na indústria gradativamente em substituição ao motor de indução. Embora de construção mais cara, o rotor da máquina é um imã de terras raras, este motor tem conquistado seu espaço pela sua eficiência, tanto em baixas velocidades quanto em velocidades altas. Porém, para o seu acionamento de forma correta, deve ser utilizado um inversor para seja garantida a sincronização precisa da forma de onda da corrente com a posição angular do rotor em cada instante de tempo. Na maioria dos inversores esse sincronismo é feito por sensores de corrente em cada fase e um sensor de posição de alta resolução. Esse tipo de motor tem como maior desvantagem a desmagnetização dos seus imãs. Sua manutenção requer ferramentas especializadas para seu manuseio. Os inversores utilizados têm características especiais para o chaveamento nesse tipo de máquina, uma vez que eles devem suportar as tensões geradas pela força magnetomotriz. A figura 21 mostra o corte transversal um motor de imã permanente.

Figura 21: Motor de corrente alternada de imã permanente



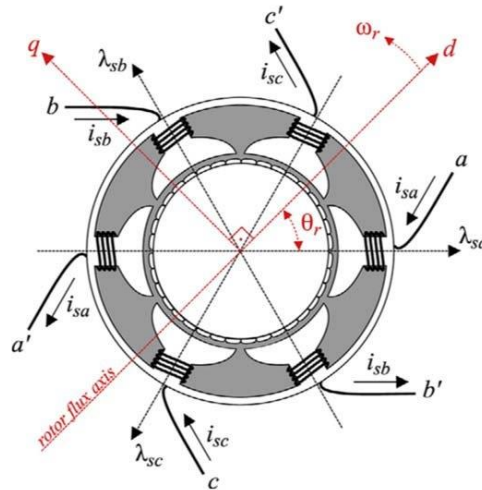
Fonte: (MURPHY, 2012)

Embora este tipo de motor ainda tenha um alto custo, ele vem se tornando cada vez mais comum em máquinas que exigem alto torque, além de ser mais eficiente que um motor de indução comum. Por não ser um motor de utilização tão comum na indústria, pois não pode ser somente conectado à rede elétrica e deve ser conectado através de um inversor com controle especializado, seu modelamento será abordado no próximo tópico.

3.2 Modelo matemático do motor síncrono de imã permanente

Na figura 22 é mostrado uma máquina síncrona de imã permanente. Os enrolamentos estatóricos a, b e c são idênticos, distribuídos equitativamente no entorno do estator, deslocados em 120°, com resistência R_s e L_i , em que $i = a, b, c$ são as correntes de fases.

Figura 22: Modelo da máquina síncrona de ímãs permanentes



Fonte: L.S. Barros - UFRN

A equação do fluxo total do estator para um Motor síncrono de ímã permanentes com fluxo trapezoidal, conforme (GRENIER; LOUIS, 1995), é dado pela eq. (8)

$$\begin{bmatrix} \lambda_{tsa} \\ \lambda_{tsb} \\ \lambda_{tsc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde:

λ_{tsa} , λ_{tsb} e λ_{tsc} : Fluxo magnético total concatenado pelas fases a, b e c do estator (Wb);

λ_{sa} , λ_{sb} e λ_{sc} : Fluxo magnético concatenado pelas fases a, b e c do estator, produzido somente pelos enrolamentos do estator (Wb);

λ_{ra} , λ_{rb} e λ_{rc} : Fluxo magnético total concatenado pelas fases a, b e c do estator, produzido somente pelos ímãs do rotor (Wb).

A equação que descreve as tensões no estator nos eixos de referência abc pode ser escrito da seguinte forma em eq. (9):

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{tsa} \\ \lambda_{tsb} \\ \lambda_{tsc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

R_s : Resistência de uma fase do estator (Ω);

v_{ga} , v_{gb} e v_{gc} : Tensões aplicadas as fases A, B e C do estator(V);

i_{ga} , i_{gb} e i_{gc} : Correntes nas fases A, B e C do estator (A).

Substituindo a equação (8) na equação (9), a eq. (10) de tensão pode ser reescrita:

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \right\} \quad (10)$$

Escrevendo o fluxo magnético produzido pelo estator, tem-se eq. (11):

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Mas como L, pode ser escrito como eq. (12):

$$L = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sb} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde:

L : Matriz de indutâncias do estator (H);

L_{sa} , L_{sb} , L_{sc} : Indutância de uma fase do estator (H);

M : Indutância mútua entre duas fases do estator (H).

Então 12 pode ser escrito como eq. (13):

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Desta forma a equação elétrica da máquina é escrita da seguinte forma eq. (14):

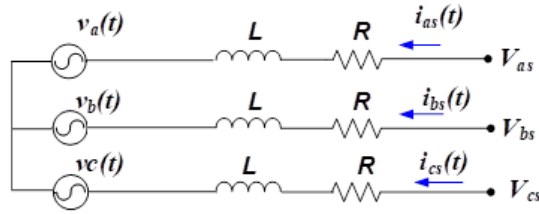
$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Quanto aos fluxos magnéticos produzidos pelo rotor e concatenados pelo estator, pode-se escrever por eq. (15):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

A figura 23 representa o circuito elétrico equivalente de uma máquina síncrona de imã permanente. Em que v_a , v_b e v_c são as tensões que surgem pela variação do fluxo concatenado gerado pelos imãs do rotor e R_e é a resistência dos enrolamentos do estator

Figura 23: Modelo elétrico do motor síncrono de imã permanente.



Fonte: o autor

Baseado na figura 23 pode-se escrever as expressões das tensões como as que estão representadas nas eqs. (16) a (18) (KRAUSE *et al.*, 2017).

$$V_{as} = R i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (16)$$

$$V_{bs} = R i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (17)$$

$$V_{cs} = R i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (18)$$

Representando-se as equações (16) a (18) de uma forma mais compacta, obtém-se eq. (20).

$$V_{abcs} = R_s i_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs}}{dt} \quad (20)$$

Representando-se as equações na forma matricial tem-se eq. (21).

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (21)$$

A transformação de PARK tem uma importância muito grande no estudo das máquinas elétricas. Consiste em uma transformação linear que simplifica as equações das máquinas, introduzindo um conjunto de variáveis hipotéticas. Fisicamente, transforma a máquina bifásica com enrolamentos estatóricos fixos girantes, em e rolamentos estatóricos fixos e rotóricos pseudo-estacionários. As equações de tensão podem ser transformadas para um sistema coordenado dq (d é o eixo direto e q é o eixo em quadratura) em um referencial síncrono usando a seguinte matriz de transformação eq. (24),

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) & \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}(\omega_s t) & -\text{sen}\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

O modelo do MSIP pode ser descrito pelas eqs. (23) e (24) a seguir

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s L_q i_{qs} \quad (23)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s L_d i_{ds} + \omega_s \psi_f \quad (24)$$

As relações entre o torque elétrico e o momento de inércia do MSIP devem ser observadas. Pois, numa frenagem do motor a energia cinética remanescente do movimento do rotor combinada à carga na ponta do eixo retorna como energia elétrica ao barramento de corrente contínua do inversor uma vez que é retificada pelos diodos dos interruptores. Então para completar a modelagem da máquina é necessário introduzir as equações relacionadas com os fenômenos mecânicos que correm na dinâmica da máquina. Assim o torque elétrico pode ser definido pela eq. (25)

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{dq} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (25)$$

E a relação entre o torque elétrico T_e , a velocidade angular ω_m e o momento de inércia J é definida pela eqs. (26) e (27).

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (T_e - T_m) \quad (26)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (27)$$

3.3 Acionamento de motores de indução por inversores de frequência

Aumentar a eficiência dos sistemas com motores elétricos e seus acionamentos vem sendo bem estudado, pois o ganho é real na troca de antigos sistemas motrizes por novos com melhor eficiência. Nesse cenário, com o avanço da eletrônica de potência, e com a queda de preço dos componentes eletrônicos, o número de motores acionados por inversores de frequência tem aumentado, principalmente porque estes acionamentos estão ficando com seu preço próximo ao dos acionamentos de partida suave existentes no mercado. Esses conversores têm a possibilidade de variação da velocidade mecânica rotacional o que faz com que o motor possa trabalhar na melhor área da curva de rendimento (JAHMEERBACUS, 2020; OLIVEIRA; UKIL, 2019).

Muitos concessionários de energia normatizam partida direta de motores em suas redes, como exemplo a norma técnica Enel CNC-OMBR-MAT-18-0124-EDCE (ENEL BRASIL, 2019), que no capítulo 6.14.3 versa sobre a partida direta de motores elétricos na rede

elétrica, limitando a potência dessas máquinas para não haver perturbações na rede elétrica. Na indústria, a partida direta de motores de grande potência pode gerar perturbações e influenciar a cadeia de processo fabril. Portanto, os motores de maior potência devem utilizar na partida chaves em estrela-triângulo, chaves compensadoras, conversores de suavização de partida ou inversores de frequência.

3.3.1 Tipos básico dos inversores de frequência no acionamento de motores

Os inversores são os responsáveis pela conversão da tensão contínua em alternada. Estes dispositivos industriais utilizam técnicas PWM para gerar um sinal alternado e podem ser do tipo escalar ou vetorial.

Os do tipo escalar utilizam a variação proporcional entre a tensão e a frequência, gerando os pulsos que serão entregues as chaves nessa técnica o motor mantém o fluxo constante. É o mais utilizado na indústria pois, na maioria das aplicações não se exige resposta rápida de torque e velocidade além do controle ser feito em malha aberta.

Já os do tipo vetorial, tem como vantagem a resposta rápida de torque e velocidade. Nesse tipo de controle dois vetores são criados, um que controla o torque e outro que controla o fluxo magnetizante. Este controle pode ser feito tanto em malha aberta sem o uso de sensores como em malha fechada para uma precisão melhor.

3.3.2 Variação de velocidade em motores de indução

Nos motores de indução o controle de velocidade pode ser feito através da frequência, escorregamento ou do número de polos do motor como podemos ver em eq. (28). Porém o número de polos de um motor é uma variável física dependente da construção da máquina que inviabiliza o uso dessa variável.

$$n = \frac{120f}{p}(1 - s) \quad (28)$$

Onde:

n é a velocidade mecânica em RPM;

f é a frequência fundamental da tensão de alimentação;

p é o número de polos da máquina de indução;

s é o escorregamento da máquina.

A variação da velocidade pelo escorregamento é bem limitada e ainda diminui o rendimento da máquina, uma vez que aumentam as perdas rotóricas.

Então a variação de frequência se torna a forma mais eficiente de variar a velocidade de uma máquina de indução. O inversor controla a amplitude da tensão enquanto varia a frequência com isso mantendo o torque constante mesmo em baixas velocidades. Isso pode ser verificado pelo torque do motor elétrico eq. (29) e pelo fluxo magnético eq. (30), que se seguem.

$$T = k_1 \times \phi_m \times I_2 \quad (29)$$

$$\phi_m = K_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (30)$$

Sendo:

T o torque disponível na ponta do eixo da máquina em N.m;

K_1 e K_2 constantes dependentes da construção da máquina;

ϕ_m o fluxo de magnetização em Wb;

I_2 a corrente do rotor dependente da carga em A;

V_1 a tensão no estator em Volts;

f_1 a frequência da tensão;

Como a corrente é dependente da carga supondo este valor fixo, variando-se a amplitude da tensão e sua frequência pode se verificar que o fluxo magnético e o torque permanecem constantes.

Embora a utilização de inversores diminua o rendimento das máquinas em comparação com uma máquina a plena carga sem inversor acoplado, essa perda é compensada pelo conjunto motor-inversor quando se requer mudanças de velocidade nos processos industriais, não há picos causados pelas correntes de partida e a partida de grandes máquinas que deve ser obrigatoriamente feita por comutação.

Na indústria vê-se o pleno domínio da corrente alternada, porém, a utilização de eletrônica nos diversos processos de produção tem aumentado o uso da corrente contínua feita através da retificação do barramento de corrente alternada. Como os processos industriais estão ficando mais precisos a utilização de controle de velocidade nos motores de indução está se tornando natural no processo industrial.

3.4 Considerações finais do capítulo

No início deste capítulo destacou-se que utilização de motores na indústria é responsável por grande parte da demanda de energia elétrica no mundo e que seu uso na indústria se deve a alta eficiência, robustez e simplicidade. Foi visto que os processos fabris estão evoluindo exigindo cada vez mais recursos técnicos para controle na produção, criando a necessidade do controle de velocidade desses motores em diversos desses processos. Esse

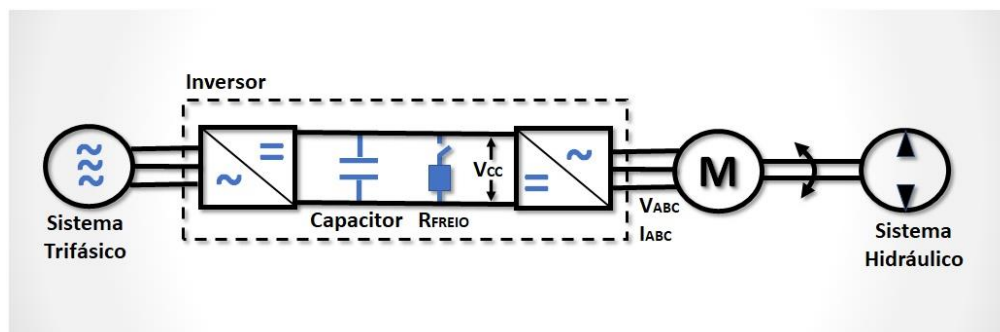
controle de velocidade não é mais convencionalmente mecânico, e sim eletrônico com conexão dos motores com inversores de frequência. Foi mostrado o modelamento elétrico do motor síncrono de ímãs permanentes que será utilizado nesse estudo, bem como uma breve explanação do funcionamento de um inversor de frequência comumente utilizado na indústria.

4 RECUPERAÇÃO DA ENERGIA NOS PROCESSOS FABRIS: ESTUDO DE CASO

Atualmente, os motores elétricos são responsáveis por aproximadamente 40% de toda energia consumida mundialmente (BONANOMI, 2016; KERSLAKE; MAHMOUDI; KAHOURZADE, 2021; MARFOLI *et al.*, 2021; RAI; SEKSENA; THAKUR, 2017). Para melhorar a eficiência dos sistemas motrizes, é possível a utilização da energia que seria desperdiçada momentos de frenagens. A regeneração de energia por sistemas de armazenamento com supercapacitores é comum para veículos elétricos uma vez que nesses sistemas qualquer quantidade de energia não desperdiçada pode ser convertida em autonomia (QUEIROZ; POMILIO, 2017; WEI *et al.*, 2018).

Embora na indústria faça o uso de motores elétricos, que nos processos fabris aceleram e desaceleram a todo instante, o uso de sistemas para recuperação de energia, no entanto, é praticamente inexistente. Na indústria de manufatura acelerar e frear motores é frequente em um processo de transformação. Durante a frenagem desses motores, o excesso de energia cinética armazenada pode ser transformado em calor diretamente por atrito em freios mecânicos ou por dissipação elétrica em sistemas eletrônicos que conectam resistores aos terminais dos motores. Nessas condições, quanto maior o número de paradas no processo, maior o desperdício de energia. A figura 24 mostra o diagrama de um motor conectado a um inversor e a um sistema mecânico.

Figura 24. Diagrama de um motor conectado a um inversor e a um sistema hidráulico



Fonte: o autor

Para se ter ideia de quanta energia é desperdiçada em um processo industrial medições elétricas podem ser realizadas para se ter um cálculo elétrico efetivo, porém é extremamente complexo calcular perdas mecânicas. Além disso, nem toda energia de movimento que resultará em uma parada de um motor elétrico pode necessariamente ser recuperada.

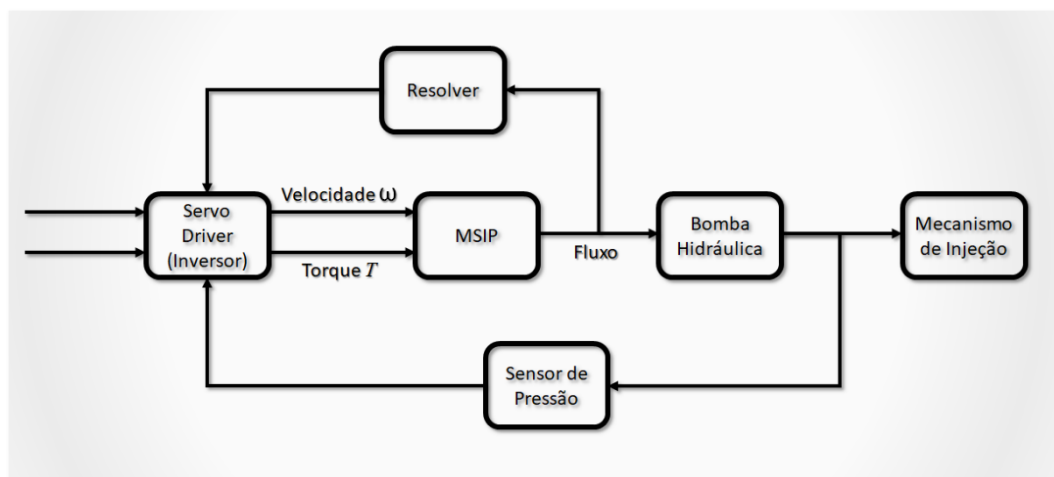
Para efeitos de simulação foi escolhido um processo eletrohidráulico de uma bomba associada a uma injeção de plástico dentre muitos outros processos em que se poderia fazer a recuperação de energia.

4.1 Energia desperdiçada em processos na Industriais.

Na indústria, a partida e parada de motores para completar um ciclo de trabalho em processo industrial é frequente. Durante a frenagem a energia cinética armazenada no rotor de um motor elétrico deve ser dissipada por freios mecânicos ou por sistemas eletrônicos com a conexão de resistores de freio quando são usados inversores de frequência. Grande parte dessa energia é transformada em calor (CARMELI *et al.*, 2013; STANA; BRAZIS, 2017; XU; YANG; GAO, 2011). Isso significa que uma parte da energia consumida pela máquina é deliberadamente desperdiçada.

Em um processo de injeção de plástico a pressão do cloreto de polivinila – PVC deve ser controlada para preenchimento de um molde. O servo driver (inversor), que controla a velocidade e o torque de um motor síncrono de ímã permanente - MSIP, recebe sinais de pressão e fluxo de material plástico dos sensores instalados na máquina. O motor mantém a velocidade e o torque nos níveis ajustados até o sistema atingir a pressão adequada e deve mantê-la até o preenchimento do molde por completo. A figura 25 representa um diagrama de blocos do sistema de controle do motor síncrono de ímã permanente numa injetora de plástico.

Figura 25. Controle do motor MSIP em uma máquina injetora de plástico



Fonte: o autor.

A energia cinética proveniente de uma desaceleração de um sistema motorizado é diretamente proporcional a velocidade angular em que o motor está girando. Considerando o

sistema hidráulico como carga inercial e desprezando o amortecimento causado pelo óleo, a variação da energia cinética na desaceleração pode ser definida por eq. (31).

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} J_t (\omega_{r_initial}^2 - \omega_{r_final}^2) \quad (31)$$

Onde:

ΔE_k é a variação da energia cinética durante a desaceleração de um motor;

J_t é o momento de inércia total do sistema motriz;

$\omega_{r_initial}^2$ é a velocidade angular inicial do rotor (início da desaceleração);

$\omega_{r_final}^2$ é a velocidade final do rotor (final da desaceleração ou parada);

O momento de inércia total do sistema hidráulico de uma injetora de plástico é a soma dos momentos de inércia do motor, acoplamentos e da bomba hidráulica. A eficiência total de um sistema com altos momentos de inércia podem ser reduzida caso haja dissipação de energia.

O momento de inércia total do sistema pode ser expresso por eq. (32).

$$J_t = J_{motor} + J_{acoplam.} + J_{Hidraulica} \quad (32)$$

Sendo:

J_{motor} o momento de inércia do rotor do motor;

$J_{acoplam.}$ o momento de inércia do acoplamento entre o motor e a bomba hidráulica;

$J_{Hidraulica}$ o momento de inércia da bomba hidráulica.

A equação mecânica da energia no motor expressa pela eq. (26) acrescida do fator de amortecimento $B\omega$ causado pela parte hidráulica, temos a eq. (33). É importante mencionar que o momento de inércia dos acoplamentos entre o motor e a bomba hidráulica foram desprezados, pois tem diâmetro e massa equivalente ao eixo do próprio motor.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{d_t} + B\omega \quad (33)$$

Segundo (GOTTBERG *et al.*, 2018; MINAV, Tatiana *et al.*, 2014; MINAV, Tatiana A.; PYRHONEN; LAURILA, 2012) é extremamente complexo equacionar as perdas em um sistema hidráulico, uma vez que as características do óleo presente nesses sistemas mudam de forma expressiva com a temperatura. Assim uma aproximação pode ser feita levando-se em consideração a parte hidráulica como uma carga com uma componente inercial. A energia cinética acumulada na máquina elétrica durante a desaceleração do motor não pode ser

totalmente recuperada em forma de energia elétrica, pois existem algumas perdas associadas, tais como: perdas mecânicas e perdas elétricas. As perdas mecânicas são provenientes do atrito do motor e da parcela de energia cinética consumida pela carga mecânica durante a desaceleração, e pelo fluido hidráulico da bomba. As perdas de origem elétrica são provenientes das perdas elétricas no motor, perdas no inversor e perdas no conversor de recuperação de energia bidirecional.

A quantidade final de energia cinética a ser recuperada, segundo (KARATZAFERIS; TATAKIS; PAPANIKOLAOU, 2017), pode ser estimada com as perdas mecânica e elétrica relacionadas de acordo com a eq. (34).

$$E_{k_útil} = \Delta E_k - E_{P_mec} - E_{P_mot} - E_{P_inv} - E_{P_con} \quad (34)$$

Onde:

$E_{k_útil}$, a quantidade de energia que pode ser recuperada;

E_{P_mec} , a perda mecânica do sistema;

E_{P_mec} , a perda elétrica no motor;

E_{P_inv} , a perda no inversor;

E_{P_con} , a perda no conversor bidirecional;

Conforme já mencionado, as perdas mecânicas são provenientes do atrito do motor e da parcela de energia cinética consumida pela carga mecânica durante a desaceleração. Dessa forma, na eq. (35) é apresentada a soma dos torques do atrito do motor e da carga mecânica, que pode representar a maioria das cargas típicas (KARATZAFERIS; TATAKIS; PAPANIKOLAOU, 2017).

$$T_{carga}(\omega_r) + T_{atrito_mot}(\omega_r) = k_0 + k_1 \cdot \omega_r + k_2 \cdot \omega_r^2 \quad (35)$$

Onde,

K_0 , K_1 e K_2 , coeficientes característicos da carga;

T_{carga} , o torque da carga mecânica;

T_{atrito_mot} , os torques do atrito do motor;

ω_r , a velocidade do rotor do motor.

A potência mecânica de uma máquina rotativa pode ser expressa pela eq. ((36)6).

$$P_m = T \cdot \omega_r \quad (36)$$

Sendo:

P_m , a potência mecânica;

ω_r , o torque.

Assim, aplicando a eq. (35) em (36) temos a potência mecânica instantânea representada pela eq. (37).

$$P_{m_i} = k_0 \cdot \omega_r + k_1 \cdot \omega_r^2 + k_2 \cdot \omega_r^3 \quad (37)$$

Logo, as perdas mecânicas, E_{p_mec} , durante a desaceleração são expressas pela eq.

$$E_{p_mec} = \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} P_{m_i} \cdot dt \quad (38)$$

.

$$E_{p_mec} = \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} P_{m_i} \cdot dt \quad (38)$$

Onde, $t_{inicial}$ e t_{final} são respectivamente o momento inicial e o final da frenagem, ou seja, correspondem ao intervalo de tempo total de frenagem regenerativa, t_{fr} , que é expresso pela eq. (39):

$$t_{fr} = t_{final} - t_{inicial} \quad (39)$$

4.1.1 Perdas elétricas

Em função do uso de ímãs permanentes no rotor do MSIP, não existem perdas de cobre no rotor, tendo em vista a inexistência de enrolamentos de campo. Sendo a grande parcela de perdas provenientes dos condutores de cobre dos enrolamentos do estator (MAIA, 2011).

Para investigar essas perdas elétricas do MSIP, as correntes devem ser estimadas. Entretanto, durante o intervalo de tempo da frenagem as correntes do motor estão variando tanto em frequência quanto em amplitude, portanto não é adequado o uso de fórmulas padrões que assumem a operação do MSIP em estado estacionário (KARATZAFERIS; TATAKIS; PAPANIKOLAOU, 2017). Assim, as equações utilizadas para o cálculo das perdas no cobre e

no ferro no rotor são desprezadas, sendo que, as perdas serão principalmente em função da corrente e das resistências das bobinas do estator do motor.

A perda no cobre é calculada usando o parâmetro de resistência do enrolamento, que em baixa frequência, são predominantemente em função do efeito Joule, e pode ser modelado por uma resistência. O cálculo aproximado das perdas no cobre pode ser determinado pela eq. (40) (YANG et al., 2017).

$$P_{cobre} = n_f \cdot I_f^2 \cdot (R_{cc} + R_{skin}(f) + R_{prox}(f)) \quad (40)$$

Onde:

P_{cobre} é a perda no cobre;

n_f é o número de fases;

I_f é a corrente eficaz de fase;

f é a frequência;

R_{cc} é a resistência CC;

$R_{skin}(f)$ é a resistência pelicular CC;

$R_{prox}(f)$ é a resistência de proximidade de fase.

A perda no ferro é a segunda maior componente de perdas em máquinas elétricas, que pode ser calculada pela eq. (41) (MTHOMBENI; PILLAY, 2006). Onde (41) é originada pela equação de Steinmetz's (STEINMETZ, 1892).

$$P_{ferro} = k_{hist} \cdot f \cdot B^n + k_{cpar} \cdot (f \cdot B)^2 \quad (41)$$

Onde:

P_{ferro} é a perda no ferro;

k_{hist} é o coeficiente de perda por histerese;

k_{cpar} é o coeficiente de perda por correntes parasitas;

f é a frequência de excitação;

n é uma constante;

B é a densidade de pico de fluxo magnético.

Assim, as perdas elétricas totais do motor durante a desaceleração podem ser calculadas na eq. (42) (KARATZAFERIS; TATAKIS; PAPANIKOLAOU, 2017).

$$E_{p_mot} = \int_{t_{inicial}}^{t_{final}} (P_{cobre}(\tau) + P_{ferro}(\tau)) \cdot dt \quad (42)$$

Para o cálculo das perdas no inversor, o intervalo de frenagem, t_{fr} , foi considerado o valor após discretização em um período de comutação, onde foi assumido que $t_{fr} \gg T_s$, a razão t_{fr}/T_s pode ser arredondada para o valor inteiro mais próximo sem nenhum erro significativo. Além disso, se a frequência de comutação for suficientemente alta, as correntes de linha são quase constantes dentro de um ciclo de comutação. Sob essas premissas, as perdas de energia por ciclo de comutação podem agora ser calculadas de maneira rápida e eficaz. Mais detalhadamente, as perdas de condução ao longo do ciclo de chaveamento, $k \in \left\{1, 2, \dots, \frac{t_{fr}}{T_s}\right\}$, são calculadas pela eq. (43).

$$E_{cond}(k) = [V_{ce} \cdot \delta(k) + V_d \cdot (1 - \delta(k))] \cdot i(k) \cdot T_s \quad (43)$$

Sendo:

E_{cond} , a perda de condução durante a frenagem em um braço de fase;

V_{ce} , a tensão na chave em condução;

V_d , a tensão direta no diodo;

δ , a razão cíclica;

k , ciclo de chaveamento;

T_s , o período de chaveamento;

i , a corrente de fase.

Por fim, as perdas de comutação para um braço de fase do inversor, por ciclo de comutação, podem ser calculadas usando a energia necessária para ligar e desligar a chave, respectivamente pelas eqs. (44) e (45):

$$E_{turn_on}(k) = E_{turn_on_test} \cdot \frac{V_{Bar}}{V_{test}} \cdot \frac{i(k)}{I_{test}} \quad (44)$$

$$E_{turn_off}(k) = E_{turn_off_test} \cdot \frac{V_{Bar}}{V_{test}} \cdot \frac{i(k)}{I_{test}} \quad (45)$$

Onde:

$E_{turn_on_test}$, a perda pela ativação da chave (dado fornecido pelo fabricante);

$E_{turn_off_test}$ é a perda pela desativação da chave (dado fornecido pelo fabricante);

V_{test} é a tensão utilizada para definir os valores de $E_{turn_on_test}$ e $E_{turn_off_test}$ pelo fabricante;

I_{test} é a corrente utilizada para definir os valores de $E_{turn_on_test}$ e $E_{turn_off_test}$ pelo fabricante;

V_{bar} é a tensão média no barramento CC durante o intervalo regenerativo.

A perda total de energia do inversor, assumindo uma carga simétrica, pode ser expressa pela eq. (46).

$$E_{p_inv} = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\frac{t_{fr}}{T_s}} (E_{cond}(k) + E_{turn_on}(k) + E_{turn_off}(k)) \quad (46)$$

O fluxo de potência ao barramento CC pode ser calculado subtraindo as perdas do inversor da potência elétrica do motor, conforme eq. (47):

$$P_{conv_ent} = P_{mot} - P_{p_inv} \quad (47)$$

Sendo, P_{conv_ent} o fluxo de potência do barramento CC do inversor para o conversor bidirecional e P_{mot} a potência do motor elétrico.

Além disso, a corrente média de entrada do conversor bidirecional pode ser expressa com uso da eq. (48):

$$I_{conv} = \frac{P_{conv_ent}}{V_{Bar}} \quad (48)$$

Os cálculos das perdas no conversor dependem da definição da topologia adotada e do volume de energia a ser processada. Como a proposta apresentada neste trabalho permite a

conexão de “ n ” máquinas ao barramento de corrente contínua, existe a possibilidade de todas as máquinas desaceleram no mesmo intervalo de tempo e com isso um grande pacote de energia é gerado em um curto intervalo de tempo, o que resulta em uma potência elevada. Assim, o conversor deve ser projetado para este cenário onde um grande pacote de energia deve ser processado, ou as resistências de frenagem devem atuar para dissipar essa energia excedente.

O superdimensionamento do conversor, para contemplar a possibilidade de processamento da energia gerada a partir da frenagem das “ n ” máquinas, pode comprometer o rendimento do sistema. Por outro lado, permitir que as resistências de frenagem atuem, implica em um desperdício de energia. Ambos os cenários precisam ser avaliados para identificar a melhor configuração a ser adotada.

Podemos inferir que para melhorar a eficiência energética do sistema, é preciso minimizar ou eliminar as perdas supracitadas nesta seção. Em relação às perdas no motor, estas podem ser minimizadas durante a especificação de projeto, onde se deve priorizar o uso de motores construídos com materiais que permitem melhorar o seu rendimento, assim como, que possuem baixas resistências. As perdas no acoplamento do motor podem ser reduzidas ou eliminadas com o uso de componentes que permitem baixo momento de inércia ou mesmo desprezível. A seleção da bomba hidráulica também deve seguir os mesmos princípios em relação à busca por materiais e formas construtivas que permitem baixos valores de inércia.

4.2 Simulações das trocas de energia entre motores e o barramento CC

De acordo com simulações realizadas por (AKIYOSHI *et al.*, 2014; TAKAHASHI *et al.*, 2010) em uma máquina de injeção de PVC, até 49% da energia desperdiçada em um processo de moldagem plástica pode ser recuperada e armazenada em supercapacitores. A energia cinética não utilizada no processo industrial e convertida em energia elétrica pelos motores é responsável pelo aumento da tensão no barramento em corrente contínua dentro do inversor e deve ser de alguma forma mitigada para que não exceda os limites de tensão dos semicondutores.

Usando o software PSIM® foi realizada uma simulação em cenários distintos para demonstrar o fluxo de potência através do barramento de corrente contínua. Essa simulação envolve mais de um motor síncrono de ímã permanente idênticos. Nestas simulações os motores serão acelerados e freados para que haja trocas de energia com o barramento. Em um primeiro momento somente um dos motores será ativado para se calcular a um valor inicial de energia que o motor pode entregar ao barramento de corrente contínua, e com o qual é possível se realizar um armazenamento. As especificações dos MSIPs estão listadas na tabela 2 e foi

considerada um torque de carga de 64 Nm para emular a operação da bomba hidráulica de uma máquina de injetora de plástico.

Tabela 2 – Parâmetros do motor síncrono de imã permanente – MSIP utilizado na simulação

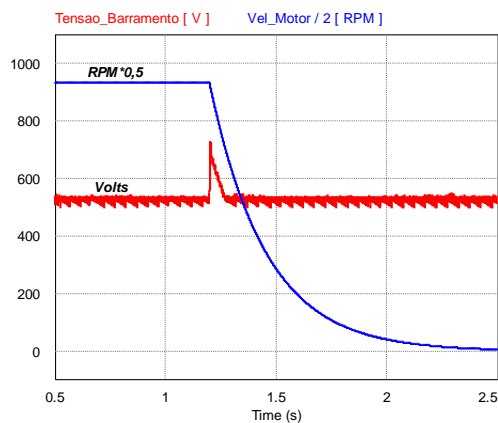
Dados de Simulação	
Resistencia do estator (Rs)	0,27 Ω
Indutância do eixo direto (Ld)	4,41 mH
Indutância do eixo de quadratura (Lq)	4,41 mH
Tensão de linha (pico) por 1000 RPM	200 Vp/kRPM
Número de Polos (P)	8
Momento de Inércia	0,012 Kg·m ²
Constante do eixo	10 ms

Fonte: o autor

4.2.1 Cenário I: com o motor em plena carga é comandada a parada

Nessa primeira simulação apenas um motor está conectado ao barramento CC e com carga no eixo. O motor está em velocidade nominal quando o comando no inversor é desligado. A partir deste instante, a energia cinética remanescente no eixo da máquina continua o movimento rotacional até parar. Em movimento de roda livre, torna o MSIP em um gerador. Então, com movimento mecânico remanescente, sem um freio mecânico para absorver a energia cinética e sem a conexão ao motor de resistores para frenagem elétrica; o barramento CC absorve a energia fazendo com que a tensão cresça até atingir um pico, e depois com a perda da velocidade por dissipação mecânica própria do motor, a tensão reduz no barramento CC e volta ao nível existente antes da parada total do motor promovido pelo bloqueio dos diodos internos do inversor, conforme pode ser visto na figura 26.

Figura 26. Variação da tensão no barramento CC e da velocidade do motor após a desaceleração do MSIP



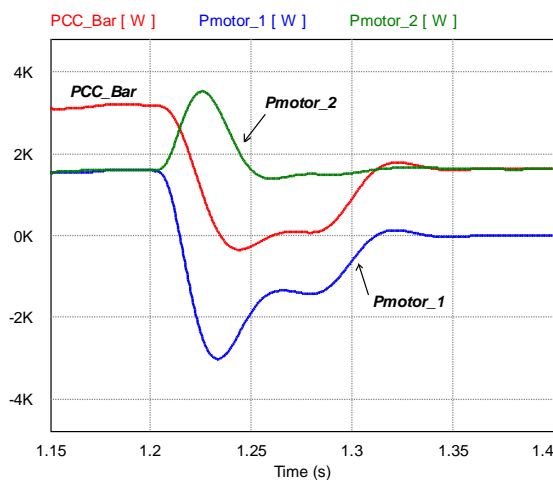
Fonte: o autor

Esse aumento na tensão do barramento CC pode ser prejudicial aos componentes semicondutores do inversor acoplado ao motor.

4.2.2 Cenário II: uso instantâneo da energia de um motor desacelerando.

A figura 27 mostra o fluxo de interação de potências de dois motores com o barramento CC, tendo como foco a frenagem de um dos motores MSIP. Os Dois motores são idênticos a plena carga e estão conectados diretamente ao barramento CC através de inversores de frequência, quando o motor 1 tem o comando desligado e inicia a sua desaceleração.

Figura 27. Fluxo de potências em watts entre os motores e o barramento CC, motor 1 freando e motor 2 a plena carga.



Fonte: o autor

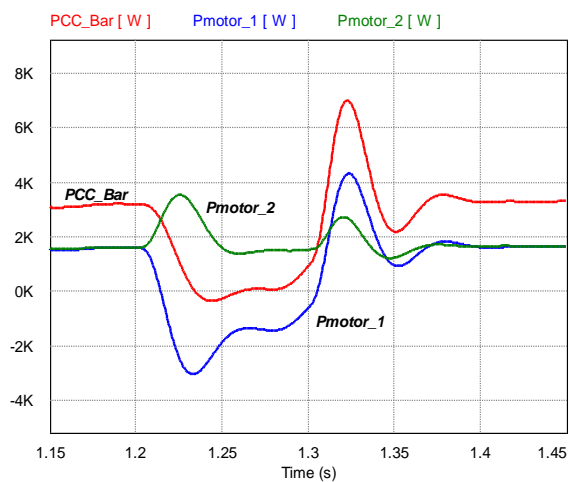
Na curva *PCC_Bar*, em vermelho, mostra o fluxo de potência no barramento de corrente contínua em watts no período de frenagem do motor 1 em segundos. Nos instantes iniciais, podemos ver que os dois motores estão absorvendo potência desse barramento, sendo a potência total igual às somas das potências dos motores. Logo após o comando do motor 1 ser desligado, no instante de 1,2s, vemos claramente na curva *Pmotor_1*, em azul, uma reversão da potência na forma de um pico inverso indicando que o motor se tornou um gerador, e a partir desse instante, passa a alimentar o barramento CC com a energia remanescente do movimento angular. Após o pico de energia, a velocidade do motor 1 cai, diminuindo a potência entregue ao barramento até o ponto o motor não consegue entregar a energia do movimento e onde uma pequena corrente circulante nos enrolamentos do estator advinda da energia armazenada na própria indutância, cria um pequeno pico positivo enquanto atravessa os semicondutores do inversor. Na curva de potência do motor 2, *Pmotor_2*, logo após o motor 1 ser desligado, observamos que há uma ligeira elevação de potência imediatamente controlada pelo inversor conectado a este motor. Esta breve elevação de potência se deve pelo aumento repentino da

tensão no barramento, pois não existe um sistema de armazenamento de energia conectado a esse barramento para absorver parte dessa energia. Por fim, a potência do barramento *PCC_Bar*, logo após o desligamento do motor 1 no instante de 1,2s, cai e a energia vinda do motor 1 passa a alimentar o motor 2 até que a energia vinda de *Pmotor_1* se esgote e a energia vinda do barramento CC passe a alimentar o motor 2.

4.2.3 Cenário III: desaceleração e aceleração de um motor com o outro conectado.

A figura 28 mostra as curvas de potências do barramento CC e dos dois motores acoplados. O motor 1 desacelera injetando energia no barramento e logo depois acelera novamente. Nesse cenário se diferencia do anterior pelas perturbações causadas ao barramento CC. Na partida do motor 1, um pico de potência no barramento CC pode ser observado bem como uma perturbação no motor 2, novamente corrigida pelo inversor.

Figura 28. Fluxo de potências com a desaceleração e aceleração do motor 1



Fonte: o autor

4.3 Dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia

Como foi visto anteriormente, a energia que é aplicada para a realização de um processo eletromotriz em uma máquina não é totalmente utilizada. Além das dissipações típicas, tanto elétrica como mecânicas já mencionadas, parte da energia remanescente do movimento rotacional nos motores, ainda presente, deverá ser dissipada para que haja a parada da máquina. O cálculo individualizado das dissipações de energia em processos fabris é complexo, pois a cada mudança de processo fabril mudariam também as perdas eletromecânicas.

A quantidade de energia que pode ser recuperada depende exclusivamente do processo industrial que a máquina está realizando, e em muitos desses processos, máquinas que utilizam inversores de frequência utilizam resistores de proteção nas frenagens dos motores para dissipar

a energia elétrica gerada pela parada motor e evitar sobretensões como vista anteriormente na figura 26. Em muitos casos, esse pico de tensão no barramento CC do inversor pode destruir os componentes semicondutores, sendo imprescindível a atuação dos resistores de frenagem.

Nesse trabalho avaliamos as perdas de energia referentes à dissipação nesses resistores, provenientes das frenagens de motores, e a possibilidade da regeneração dessa energia para ser reutilizada nos processos seguintes mitigando a perda. Assim, energia dissipada na frenagem de um motor pode ser calculada a partir da curva de potência dissipada pela proteção, como pode ser visto na eq. (49).

$$E_{Fr} = \int_0^t P_d \cdot t \quad (49)$$

Onde, E_{Fr} é a energia dissipada durante a frenagem em Joules;

P_d é a potência dissipada em watts;

t é o intervalo de tempo representando a atuação do sistema de proteção.

Partindo da energia dissipada é possível dimensionar um banco de capacitores capaz de absorver e armazenar essa energia para um processo fabril ou período de frenagem. Na simulação do cenário I, foi verificado que a tensão do barramento CC aumenta com a desaceleração do motor, então devemos calcular o banco de capacitores com base na energia dissipada e a variação da tensão no barramento, como mostrado na eq. (50).

$$C = \frac{2 \cdot E_{Fr_{máx}} \cdot N_{motores}}{V_{Bar_{máx}}^2 - V_{Bar_{min}}^2} \quad (50)$$

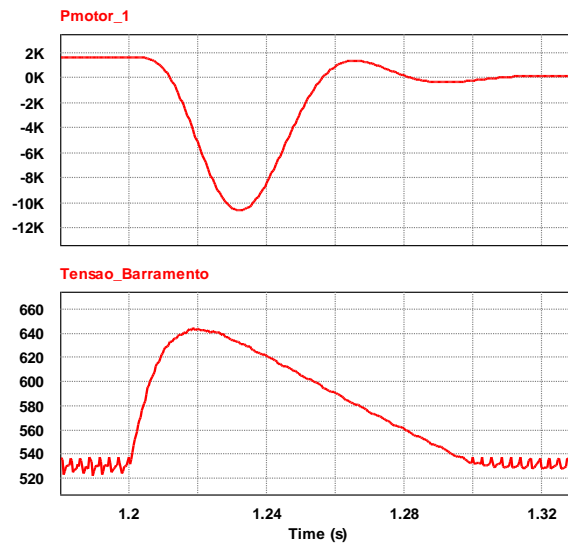
Onde, $E_{Fr_{máx}}$ é a energia que pode ser recuperada durante a maior frenagem;

$N_{motores}$ é o número de motores que podem desacelerar no mesmo instante;

$V_{Bar_{máx}}$ é a tensão máxima do barramento CC;

$V_{Bar_{min}}$ é a tensão mínima do barramento CC;

Figura 29. Curva de potência em watts do motor 1 em desaceleração e tensão no barramento em volts



Fonte: o autor

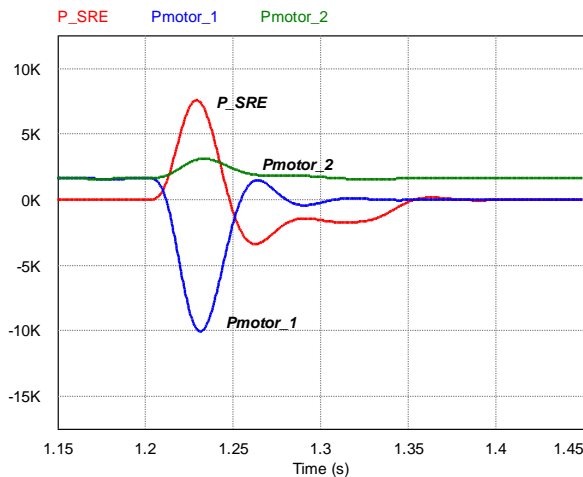
Utilizando as ferramentas do software Psim nas curvas da figura 29 com a simulação da potência do motor 1 e da tensão no barramento CC é calculado o valor médio de energia da frenagem, conforme a eq. (49). Fazendo essa energia igual a $E_{Fm\acute{a}x} = 159,55 \text{Ws}$, o número de motores igual a 2 e retirando da simulação os valores de tensão máxima e mínima do barramento podemos então dimensionar o tamanho do banco de capacitores utilizando a eq. (50), conforme pode ser visto na eq. (51).

$$C = \frac{2 \cdot E_{Fm\acute{a}x} \cdot N_{motores}}{V_{Bar_m\acute{a}x}^2 - V_{Bar_min}^2} = \frac{2 \cdot 159,55 \text{Ws} \cdot 2}{740,59^2 - 529,06^2} = 2,252 \times 10^{-3} \text{F} \quad (51)$$

Para validar o cálculo e verificar o funcionamento do sistema de recuperação de energia - SRE, uma nova simulação do cenário II foi realizada com a adição desse banco de capacitores no barramento CC. A figura 30 mostra a troca de energia entre os dois motores conectados ao barramento CC e o sistema de recuperação de energia. Podemos observar que a curva P_{SRE} inicialmente está em repouso, pois não existe mudanças de tensão no barramento para que haja trocas de energia entre os capacitores do banco e o barramento CC. No instante em que é comandada a parada do motor, o aumento da tensão do barramento causado pela energia cinética remanescente no eixo do motor 1, conforme já explicado, causa um desequilíbrio de energia no barramento que é instantaneamente absorvida pelo SRE. A curva de potência Pmotor_1 praticamente é refletida pela curva P_{SRE} . Como visto anteriormente na figura 27, existem algumas diferenças nas curvas de potências do barramento e dos motores

conectados. Observamos que na curva do motor 1 o pico de potência tornou-se maior quando o SRE foi conectado, porém o tempo de duração desse pico é bem menor que o observado com o sistema desconectado. A troca de energia nesse caso é praticamente a mesma. Com a curva de potência do motor 2, o distúrbio causado pela sobretensão repentina ainda existe, mas um pouco mais suave.

Figura 30. Curvas de potência dos motores e do SRE.



Fonte: o autor

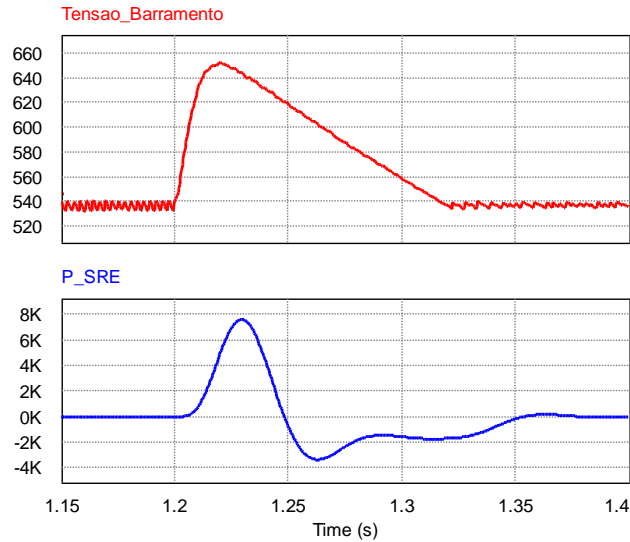
4.3.1 Efeito da resistência dos condutores de conexão do SRE ao barramento CC.

O sistema de recuperação de energia deve ser conectado em paralelo ao barramento de corrente contínua, e na melhor configuração, esse sistema deveria ficar equidistante de todas as máquinas as quais estariam conectadas ao barramento. Porém, isso é impraticável pois o barramento seria uma estrela com um ponto central. Dessa forma, simulamos um cenário no qual colocamos o SRE numa ponta do barramento, a uma distância ôhmica de 30 metros de cabos do ponto de conexão com o motor. Considerando o pior caso o diâmetro do cabo calculado seria para o valor de médio da corrente do sistema, considerando que o SRE estivesse conectado aos terminais dos motores.

Para o cálculo da corrente média utilizamos as ferramentas do software PSIM entre os tempos que ocorrem as trocas de energia com o SRE, sendo que no primeiro momento, no carregamento do sistema, essa energia é maior devido ao pico de tensão. Utilizando os mesmos parâmetros da simulação feita no cenário dois, vemos na figura 31, a tensão do barramento CC e o fluxo de potência no SRE, a tensão máxima do barramento CC é de 650 Volts enquanto a potência máxima absorvida pelo banco de capacitores é de 7,73 kW. Admitindo-se que a absorção de energia pelo SRE parte do tempo de 1,204s, logo após a elevação da tensão do

barramento, e termina no ponto em que o fluxo de potência cai a zero em 1,248s, calculamos o valor médio da corrente como sendo 6,07A.

Figura 31. Curvas da tensão e fluxo de potência no SRE, sem resistência de conexão.



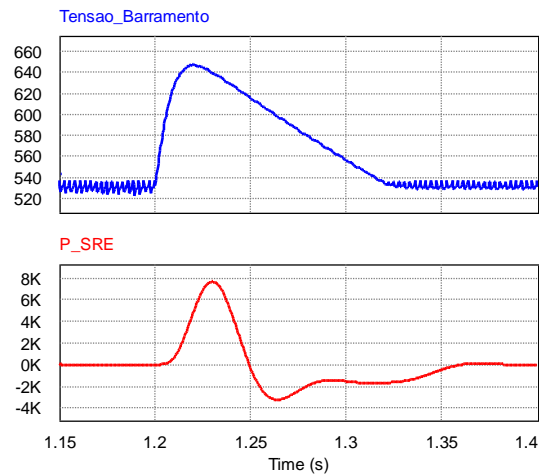
Fonte: o autor

Nota-se que a corrente média tem um valor baixo, pois a corrente calculada refere-se a apenas uma máquina. Levando-se em consideração que os dois motores conectados ao barramento podem entrar em processo de frenagem ao mesmo tempo essa corrente média poderia dobrar, assim foi assumida uma corrente média de 12 Ampères para a seleção da seção do cabo de conexão do SRE. Seguindo as normas da ABNT, a NBR 5410 vigente, selecionamos um cabo por seção mínima de 2,5mm² o qual possui resistência máxima de 7,56 Ω/km segundo a norma NBR NM 280:2011. Assim temos na eq. (52) o cálculo da resistência total supondo 30 metros de cabo.

$$R_{cabo_{30m}} = \frac{7,56\Omega/km * 30m}{1000} = 0,2268 \Omega \quad (51)$$

Uma nova simulação foi realizada com os valores das resistências dos cabos associadas ao sistema de recuperação de energia conforme mostrada na figura 32. Nessa simulação em comparação com a mostrada pela figura 31, as diferenças dos valores de energia absorvida pelo ser são imperceptíveis, bem como alterações de tensão do barramento, indicando que mesmo com a resistência associadas aos cabos ainda se tem recuperação de energia. Em parte, esse comportamento pode ser creditado ao fato que as tensões do barramento são altas e as correntes baixas, diminuindo as perdas e corroborando com o que foi dito no item 2.2.1.

Figura 32. Tensão no barramento CC [V] e fluxo de potência no SRE [W] com as resistências dos cabos adicionadas.



Fonte: o autor

4.4 Considerações finais do capítulo

A partir da comparação das simulações realizadas concluímos que o sistema de recuperação de energia é efetivo nas situações de frenagem de uma máquina. Embora a quantidade de energia que pode ser absorvida seja pequena, é importante ressaltar que as simulações tratam de apenas um breve período do funcionamento dos motores de uma máquina na manufatura de uma peça. As máquinas em um mesmo processo de manufatura, partem e param constantemente seus motores o que ao longo do tempo, com várias repetições, aumenta a quantidade de energia desperdiçada.

O dimensionamento do sistema de recuperação de energia a partir das curvas de potência é válido, pois como mostraram as simulações, os valores de energia absorvidos pelo banco de capacitores são praticamente os mesmos que teriam sido dissipados pelos resistores de proteção nos inversores. Podemos concluir que mesmo com a variação da magnitude da tensão no barramento CC, os motores conectados a esse barramento não sofrem significativas variações no seu funcionamento, sendo, factível a realização de testes em máquinas reais como prova do funcionamento de um barramento CC com tensão variável.

5 PROPOSTA DE BARRAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA COM TENSÃO VARIÁVEL E RECUPERAÇÃO DE ENERGIA PARA INDÚSTRIA

As microrredes em corrente contínua, MRCCs, aplicadas na distribuição de energia renovável e para os novos barramentos em edificações comerciais, conforme mostrado na seção 2.2, têm como característica a tensão fixa. E em muitos trabalhos de pesquisa nessa área, podemos constatar que o foco é o controle de tensão do barramento, tal como o proposto por (SHUAI *et al.*, 2018) em seu artigo, que traz uma nova topologia hierárquica do barramento em conjunto com uma metodologia de controle da tensão no intuito de melhorar a eficiência e a confiabilidade em uma MRCC. Em um outro artigo, (KUMAR; AGARWAL; AGARWAL, 2019) faz uma revisão em topologias de microrredes em corrente contínua enfatizando o controle da tensão, e ainda faz referências que em MRCC com tensão acima de 48 V os sistemas de armazenamento de energia não são conectados diretamente ao barramento.

Propõe-se aqui a quebra dois paradigmas comuns na indústria: um em relação à magnitude de tensão fixa do barramento para suprir as cargas motrizes, e o outro, com a troca do barramento em CA para um barramento em CC, pois com a evolução da eletrônica, os motores antes conectados diretamente ao barramento CA, passaram a ser alimentados por conversores que retificam a corrente alternada transformando-a em contínua para depois fazerem a inversão para corrente alternada consequentemente aumentando as perdas com uma conversão a mais. Com relação à variação da tensão, esses conversores se utilizam componentes e técnicas de controle nas quais podem operar dentro de uma faixa ampla, mantendo a sua confiabilidade e eficiência.

Neste contexto, esse trabalho propõe um novo conceito de barramento de corrente contínua com tensão variável para indústria, associado a um sistema de recuperação de energia com capacitores conectados diretamente ao barramento CC.

5.1 Nova concepção de barramento em corrente contínua com tensão variável e recuperação de energia

Este trabalho propõe uma topologia de barramento em corrente contínua com tensão variável para a alimentação do sistema de acionamento dos motores na indústria, e com recuperação de energia cinética que é armazenada em um banco de capacitores, visando substituir o barramento de corrente alternada. A unidade de armazenamento de energia é conectada diretamente ao barramento em corrente contínua para recuperação da energia cinética que seria desperdiçada nas frenagens pelos motores. Essa energia armazenada fica disponível

para ser reutilizada em uma nova partida de motores conectados ao barramento, reduzindo assim a quantidade de energia que deveria ser disponibilizada pela fonte primária ao qual o barramento CC está conectado.

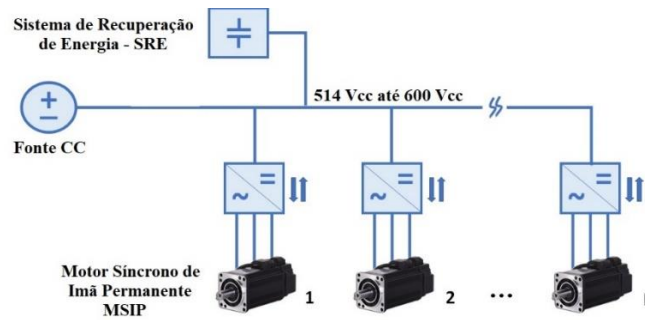
Com o sistema de armazenamento em corrente contínua conectado diretamente ao barramento CC, não há necessidade da utilização de retificadores bidirecionais, pois não haveria ganho com uma conversão de energia a mais. Além disso, os retificadores bidirecionais para alta corrente têm resposta crítica para a recuperação de energia de frenagens de motores e são caros quando comparados aos tradicionais retificadores unidirecionais de alta corrente (GUEDES, Aderaldo R. *et al.*, 2017; LIMA *et al.*, 2017).

No artigo de (QUEIROZ; POMILIO, 2017) é apresentado a frenagem regenerativa para um veículo elétrico mostrando um modelamento dinâmico para os conversores de um motor síncrono de ímã permanente, no qual a tensão no barramento de corrente contínua é variável. E afirma que essa variação na tensão não afeta de maneira significativa as correntes no MSIP. No mesmo trabalho mostra que é mais eficiente conectar os capacitores do sistema de regeneração de energia diretamente ao barramento CC ao invés de utilizar conversores para essa interconexão. Essa recuperação de energia em um veículo elétrico é similar ao que se propõe para a indústria, pois a recuperação de energia é feita a partir de um motor que tem redução em sua velocidade. Da mesma forma proposta pelo artigo, o armazenamento da energia recuperada dos motores na indústria é feito por um banco de capacitores, e por analogia, a opção pela conexão direta do banco de capacitores ao barramento CC a torna mais viável; porém, utiliza-se um circuito de carga temporizado no banco de capacitores para reduzir a corrente de *in-rush* do carregamento inicial, conforme mostrado por (GUEDES, Aderaldo Ricarte, 2018).

Basicamente, o barramento CC proposto é oriundo de um conversor CA-CC, que não será foco deste estudo, que pode ser colocado tanto próximo às máquinas como em uma subestação. A tensão média retificada do barramento CA de 380 V (mais comum nas indústrias) é de 514 V CC de magnitude, que é a tensão mínima para a garantia da partida das máquinas conectadas ao barramento. Nas frenagens ao longo dos processos fabris, os motores conectados aos inversores tornam-se geradores, e essa tensão gerada acaba elevando a tensão do barramento que poderá assumir valores com magnitude de até 600 V CC. Então, essa elevação da magnitude da tensão no barramento CC deve respeitar os limites de segurança permitidos aos semicondutores dos dispositivos de acionamento. O banco de capacitores é necessário para regular a quantidade de energia pois, se houver mais energia disponível no barramento do que consumo instantâneo dos motores conectados ao barramento de corrente contínua, a tensão pode subir a valores não suportados pelos dispositivos dos acionadores. Caso os capacitores

estejam totalmente carregados, e ainda assim houver disponibilidade de energia, a proteção com os resistores dos inversores atuará para dissipar a energia em excesso. Vale ressaltar, que não foram feitas modificações nos inversores que controlam os motores da máquina de injeção e a alimentação destes conversores foi feita diretamente pelo barramento de corrente contínua interno. A topologia da rede proposta pode ser vista na figura 33.

Figura 33: Topologia proposta de barramento em CC com tensão variável



Fonte: autor

O retificador, o sistema de proteção, a estrutura da rede de cabos e acessórios associados ao barramento de corrente contínua não são foco deste trabalho, devendo ser estudados em trabalhos futuros. O foco principal é o estudo da redução do consumo de energia proveniente da troca do barramento de corrente alternada pelo barramento de corrente contínua no ambiente industrial. Esta troca supõe a retirada do retificador da entrada do inversor, reduzindo o número de conversões de energia. Além disso um sistema de armazenamento de energia é integrado ao barramento para melhorar sua eficiência.

5.2 Estudo do barramento CC proposto no chão de fábrica

No capítulo 4 foram realizadas simulações das trocas de energia entre o barramento em corrente contínua, os motores e o sistema de recuperação de energia. Para validar essas simulações, passamos para um sistema real em uma fábrica de calçados.

Para o experimento foram utilizadas injetoras de plástico da marca Golden Eagle modelo GEK 180/S e GEK 220/S produzindo pequenas peças em Cloreto de Polivinila - PVC usadas em detalhes de sandálias. Na figura 34 mostra como foram alocados os equipamentos de medição, de forma improvisada, na qual um funcionário da manutenção da empresa ajudou na conexão. Foram utilizados um analisador de energia Embrasul RM6000 (1), duas ponteiras de alta tensão da Tektroniks (2), duas ponteiras de alta corrente e seus amplificadores da Tektroniks (3) e um osciloscópio Tektroniks (4).

Figura 34: Montagem dos equipamentos de medição na Injetora



Fonte: o autor

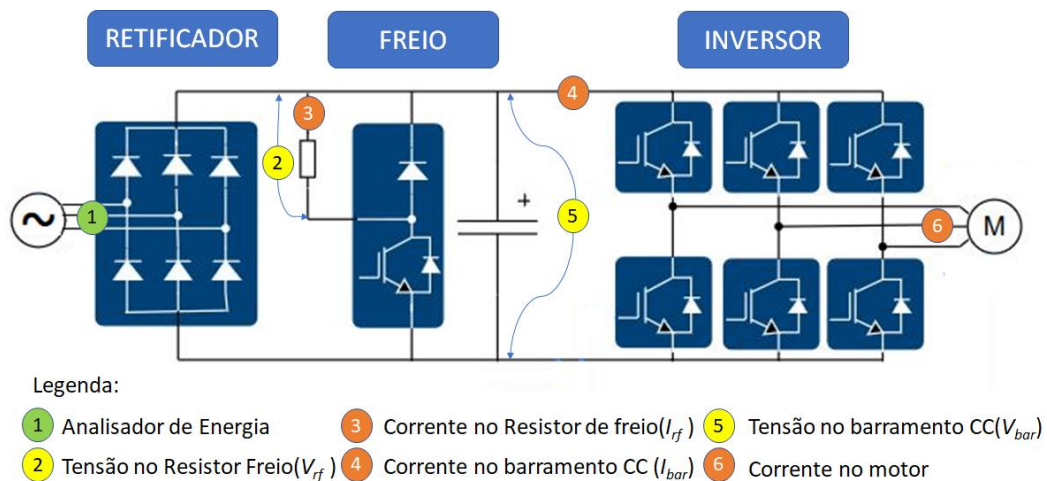
As duas máquinas que foram utilizadas para a retirada de dados possuem os mesmos motores síncronos de ímã permanente de 20kW modelo ULTRAC 3F (PHASE USA INC, [5. d.]) com os parâmetros definidos na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros dos motores utilizados no experimento na fábrica.

Dados técnicos	Motor Síncrono de Ímã Permanente
Fabricante/Modelo	Phase/U310F10
Potência nominal	20,3 kW
Rendimento	0,95%
Torque Maximo	130 Nm
Veloc. Nominal	2000 rpm
Corrente nominal	42,5 A
Tensão nominal	359 V
Constante de Torque	2,86 Nm/A
Resistência do enrolamento	0,26 Ohm
Indutância do enrolamento	4,06 mH
Inércia do rotor	130 kgcm ²
Nº de polos	8
Peso	70 kg

Todas as medições e gráficos foram realizadas utilizando o esquemático mostrado na figura 35, onde, V_{bar} é a tensão no barramento CC, ponto de medição 5 na figura e V_{rf} é a tensão no resistor de frenagem, ponto de medição 2 na figura. As sondas de corrente foram conectadas nos pontos I_{bar} (corrente no barramento CC) e I_{rf} (corrente no resistor de frenagem).

Figura 35. Posição das ponteiras de corrente e tensão no inversor da injetora



Fonte: o autor

A operação da máquina é semiautomática que consiste no fechar da porta para iniciar o processo de injeção de PVC. Terminada a injeção a porta é aberta retira-se o material finalizado manualmente e recomeça-se nova operação. A máquina estava configurada de acordo com parâmetros de processo de injeção pré-estabelecidos pela empresa em função do molde utilizado. O ciclo de operação da máquina se inicia com o fechamento da porta, onde os seguintes movimentos e ações são realizados: fechamento e travamento do molde, injeção de material no molde, tempo de resfriamento do material e carregamento de material no cilindro de plastificação. Após isso a máquina realiza o movimento de abertura do molde e o componente injetado pode ser removido, e assim, um novo ciclo de operação pode ser iniciado

A figura 36 mostra o resultado experimental com a curva de potência no processo de injeção durante um ciclo. Nota-se que a maior potência envolvida é dada na etapa de plastificação, quando resistores são utilizados para o derretimento do plástico e essa energia não pode ser reutilizada.

Na figura 37 é mostrado um ciclo total da produção de peça de PVC, que tem duração aproximada de 18 segundos. Nesta aquisição a tensão no barramento de corrente contínua, canal 1 em azul escuro, atingiu 595 V e a corrente no mesmo barramento, canal 2 em azul claro, picos de 70 A.

Figura 36: Medidas de potência para um ciclo de injeção, em vermelho a potência na entrada principal e em azul as medições na entrada do conjunto motor/driver

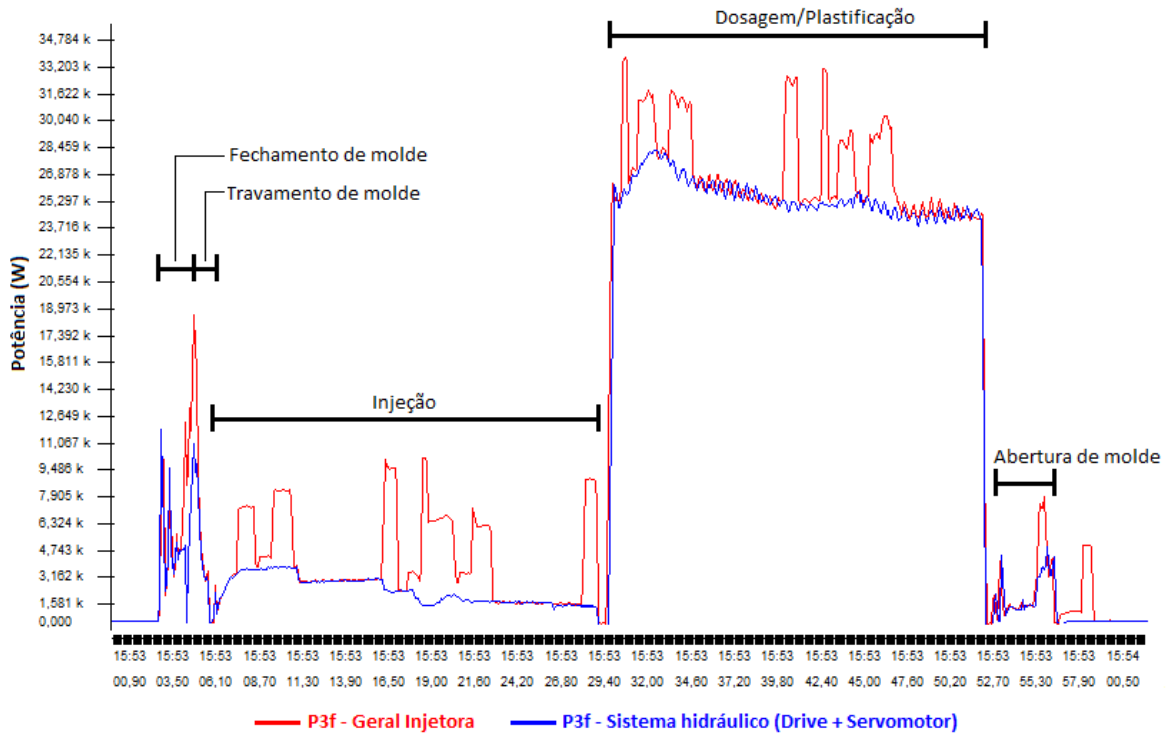
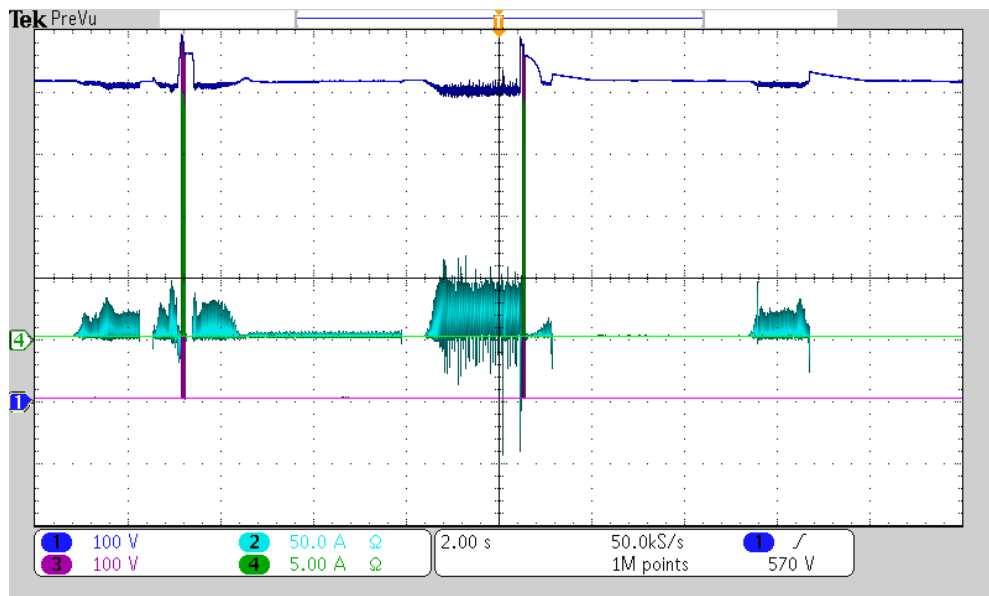


Figura 37: Resultados experimentais tensão e corrente no barramento CC com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (2 s por div.).



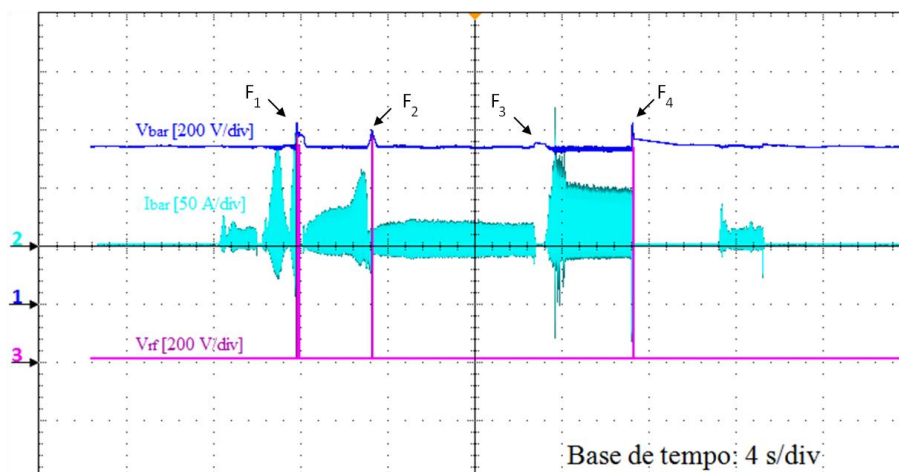
Essa demanda rápida de energia e com frenagens duram no máximo 80 ms, observou-se que para a utilização de conversores no sistema de armazenamento de energia seria um

desafio, pois seria necessário que os conversores trabalhassem com altos picos de corrente e tensão e que mantivessem alta eficiência em uma faixa larga de operação, pois observa-se que as quantidades de energia são pequenas e em picos instantâneos.

5.3 Capacitores ou supercapacitores no sistema de armazenamento de energia?

O barramento CC proposto neste trabalho tem em sua composição um sistema de armazenamento de energia que absorve a energia cinética recuperada nas frenagens dos motores. Este sistema é particularmente necessário, pois, ainda que o barramento de corrente contínua tenha tensão variável, existem limites a serem observados e esse sistema é fundamental para evitar picos repentinos de tensão. Para uma maior eficiência este sistema de armazenamento deve então ser dimensionado com base na quantidade de energia remanescente das frenagens. Como ponto de partida, medições de tensão e corrente foram tomadas para se determinar o quanto de energia deve ser armazenada bem como o nível de tensão ao qual se submeterá o banco de capacitores. A figura 38 mostra as medições de tensão e corrente no inversor de uma injetora GEK 220/S produzindo pequenas peças de PVC e com ciclo completo de aproximadamente de 25 segundos. Durante a produção dessas peças, o motor da máquina sofreu quatro frenagens, mostradas como F_1 a F_4 . No entanto, apenas em três destas frenagens, F_1 , F_2 e F_4 , foi necessário a atuação do resistor de freio, mostrada pela medição de tensão no canal 3 do osciloscópio, quando a tensão do barramento de corrente contínua subiu acima do limite seguro ao inversor, mostrada no canal 1. A proteção do inversor estava configurada para atuar em níveis de tensão acima de 10%, da tensão nominal máxima do barramento CC interno de 540 Volts então a proteção deveria atuar em torno dos 600 V como o observado.

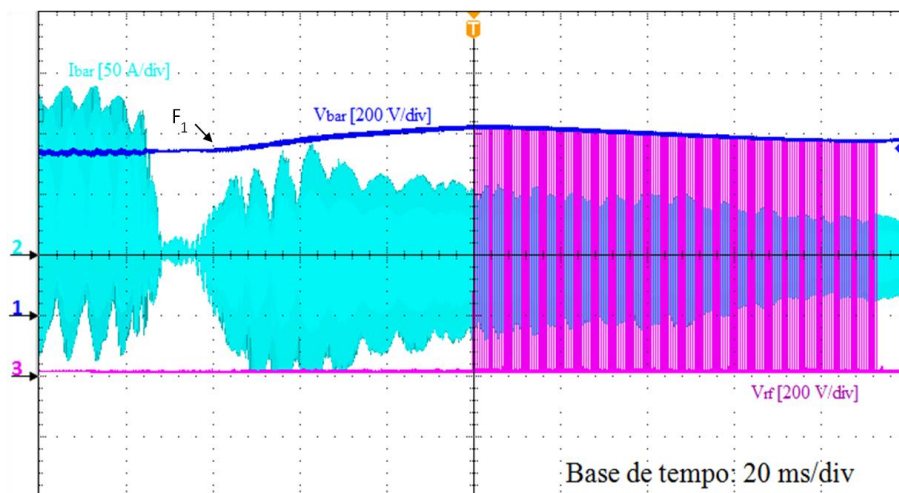
Figura 38: Resultados experimentais em um ciclo completo de injeção de componentes. Ch 1 (200 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}) e Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}). Base de tempo: (4 s por div.).



Fonte: autor

Em um processo industrial, quanto maior o número de frenagens, maior a possibilidade de recuperação de energia. Na frenagem F_1 o processo de desaceleração eleva a tensão do barramento de corrente contínua para 622.7 V, acionando o resistor de freio. O tempo de duração dessa frenagem é de aproximadamente 92 ms, observando que esse motor tem momento de inércia baixo em $0,12\text{kgm}^2$. O detalhe da frenagem é mostrado na figura 39. O dado interessante a se observar na figura é a curva da corrente do barramento que inicia o quadro com valor médio positivo tem um ponto de parada, no segundo quadro de tempo, com o comando de desligamento no inversor e logo em seguida passa a um valor mais negativo, quando ocorre a subida da tensão no barramento culminando com a entrada da proteção no centro do quadro.

Figura 39: Detalhe da primeira desaceleração do motor da GEK 180/S com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (200 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}) e Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



Fonte: autor

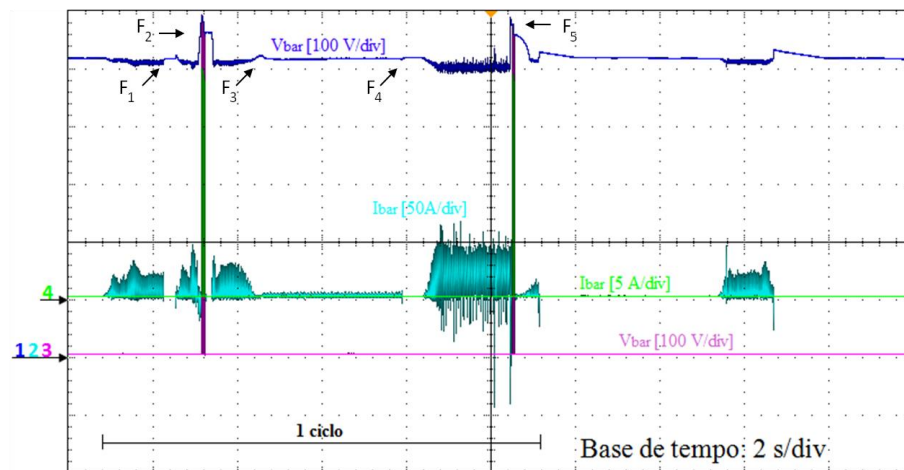
Para melhor compreender o processo, junto as variáveis medidas, trocamos de máquina de injeção por uma com capacidade de pressão menor e com molde de injeção para a produção de outras peças plásticas um pouco mais volumosas.

A figura 40 mostra os valores de tensão e corrente adquiridos em uma máquina injetora GEK 180/S, onde o número de frenagens é maior, pois esta máquina estava produzindo peças com carga de injeção de 210 gramas e o período de um ciclo completo em torno de 16 segundos. Foi utilizada a mesma metodologia de aquisição para a máquina GEK 220/S. Na produção dessas peças o consumo médio de energia do motor foi de 1,3 kWh. Nesse ciclo de produção das peças, o motor sofreu cinco frenagens, F_1 a F_5 e em apenas duas delas a proteção foi acionada em F_2 e F_5 . Na frenagem F_3 o motor síncrono desacelera e logo em seguida acelera

novamente antes de parar totalmente, assim não sendo necessário o acionamento da proteção. Nessa frenagem a energia é retornada ao barramento CC e consumida pelo próprio inversor. Nas frenagens F_1 e F_4 o motor desacelera e a energia cinética é dissipada pela própria carga mecânica, a bomba hidráulica. O acionamento da proteção com a conexão do resistor de freio ao circuito é feito em duas ocasiões, em F_2 e F_5 , onde a tensão do barramento de corrente contínua ultrapassa 10%, mesmos parâmetros assumidos anteriormente.

Ainda é possível observar na figura 40 que a corrente no barramento, canal 2 em azul claro, se torna negativa nos pontos de frenagem de maior energia cinética onde há atuação dos resistores de freio.

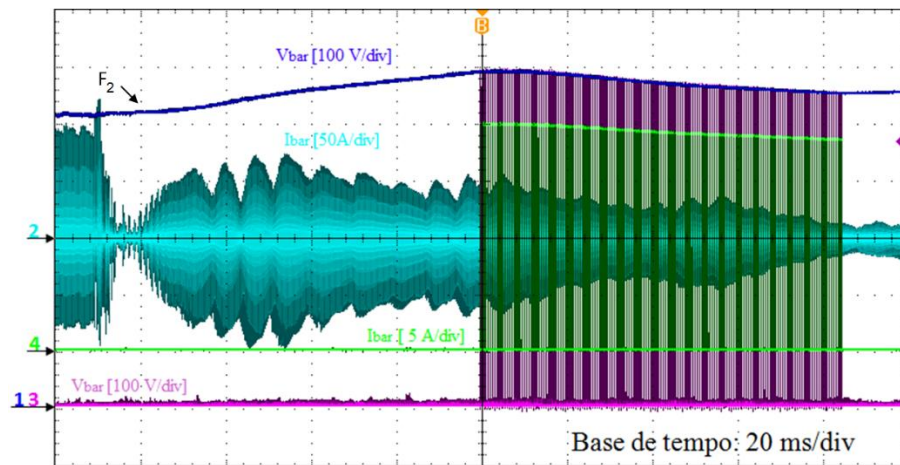
Figura 40: Resultados experimentais em um ciclo completo de injeção de componentes. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (2 s por div.).



Fonte: autor

A figura 41 mostra o detalhe da frenagem F_2 em que o acionamento do resistor de freio foi necessário. O tempo de duração do acionamento da proteção é de aproximadamente de 85 ms e a tensão do barramento CC atingiu a magnitude de 594,7 V. Essa tensão foi limitada pela atuação do resistor de freio, que dissipou parte da energia e permaneceu acionado até que o barramento voltasse a uma tensão configurada como segura. Como pode ser observado nessa figura o resistor de frenagem não é acionado permanentemente, sendo chaveado pelo comando da proteção. Esse resistor tem valor 15 Ohms e potência máxima de 1500 W.

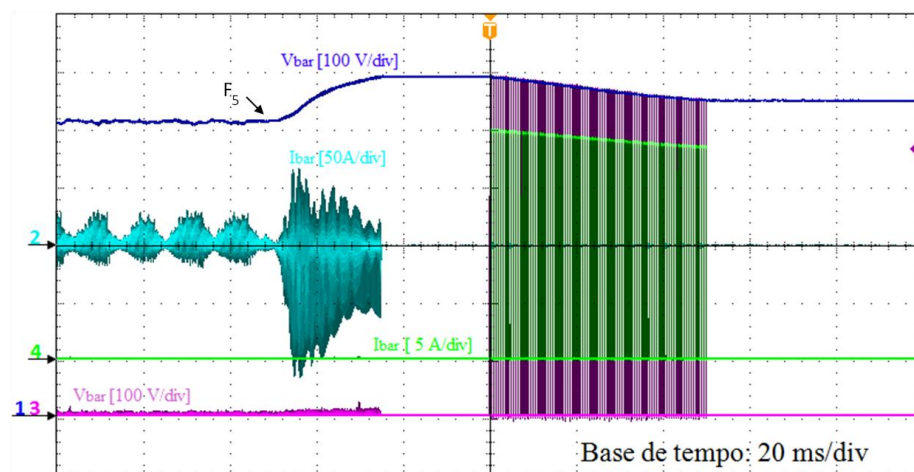
Figura 41: Desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem em F₂. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



Fonte: autor.

O outro período em que é necessário a atuação do resistor de freio ocorre em F₅, onde a tensão atinge valor de 593 V e tem duração de 50 ms. O detalhe dessa frenagem é mostrado na figura 42.

Figura 42: Detalhe da desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem em F₅. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (100 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (5 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



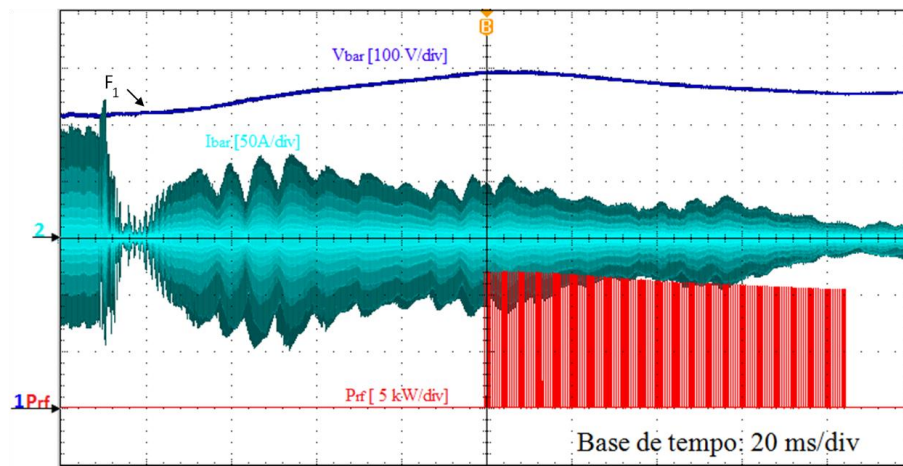
Fonte: autor

Com os dados coletados nas duas frenagens em que foi necessário a atuação dos resistores é que se procede o dimensionamento do banco de capacitores. A energia dissipada pela resistência em calor pode ser armazenada e reusada pelo próprio motor da máquina de injeção de plástico ou de outras máquinas conectadas ao mesmo barramento. Com o auxílio da

função matemática do osciloscópio, bem como do arquivo de pontos gerados na medição é calculada a potência média em cada uma das etapas de frenagem em que foi utilizado o resistor de proteção. Posteriormente é feito o cálculo da energia que poderá ser armazenada pelo sistema com os capacitores.

Assim, a potência média dissipada no resistor de freio que foi calculada pela função do osciloscópio é mostrada na figura 43. De posse dos valores é calculado o valor médio de potência.

Figura 43: Potência dissipada na primeira desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), e P_{rf} (5 kW por div. – vermelho) – potência no resistor de frenagem (P_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



Fonte: autor

Então, a energia dissipada na frenagem pode ser determinada por eq. (52).

$$E_{Dfr} = P_d \cdot t \quad (52)$$

Onde:

E_{Dfr} é a energia dissipada na frenagem (J);

P_d é a potência média dissipada durante a frenagem (W)

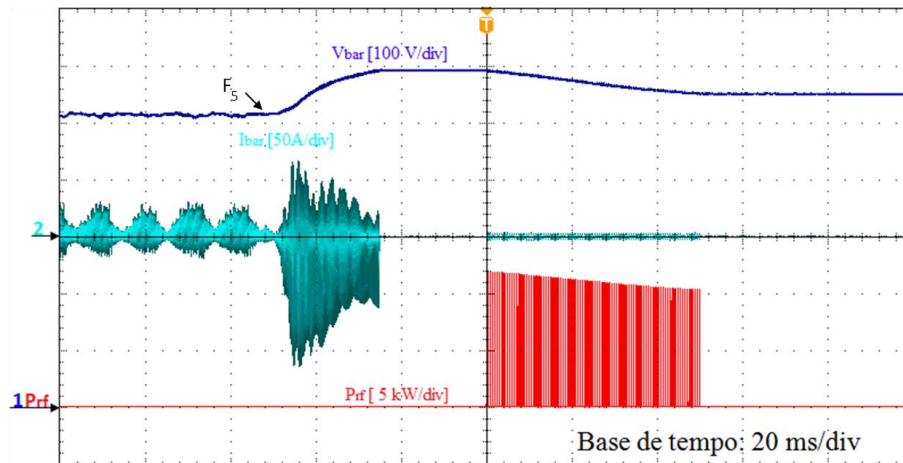
t é o tempo da janela de captura do osciloscópio (s)

Utilizando os dados mostrados figura 43, o valor médio da potência calculado pelo recurso matemático do osciloscópio foi de 780,7 W, para um tempo de janela de 200 ms. Então, usando eq. (52) chegamos a um valor de 156,14 J dissipados no resistor de freio.

O segundo acionamento do resistor de freio no qual se tem perda de energia na forma de dissipação de calor é mostrado pela figura 44. Podemos observar que os níveis de potência são elevados, com picos superiores a 10 kW, mas o valor médio é baixo pois há um

chaveamento do resistor pelo inversor. Caso a resistência fosse apenas conectada diretamente ao barramento, mesmo por um intervalo pequeno de tempo, poderia ser destruída.

Figura 44: Segunda desaceleração do motor com a atuação da resistência de frenagem. Ch 1 (100 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (50 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), e P_{rf} (5 kW por div. – vermelho) – potência no resistor de frenagem (P_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



Fonte: autor

Da mesma forma como foi calculada a energia dissipada na primeira frenagem, deve-se calcular para a segunda frenagem em que houve a atuação do resistor de freio. Portanto, a energia total será a soma das duas parcelas de energia dissipada pelo resistor. Para o cálculo da energia dissipada na segunda frenagem a potência média calculada pelo osciloscópio foi de 383,2 W, utilizando o mesmo tempo de janela do osciloscópio de 200 ms, temos como resultado o valor de 76,44 J ou 0,0212 Wh.

Assim, a energia que seria dissipada pelo resistor de freio na produção de uma peça de PVC de 210 gramas, em 16 segundos, e que pode ser armazenada, deve ser a soma das energias das duas frenagens, tendo na primeira frenagem um valor de 156,14 J, e na segunda frenagem, um valor de 76,44 que resulta um total de 232,58 J. Se for considerado o tempo de produção desta peça em uma hora ocorreriam 225 ciclos, então a energia total dissipada por hora seria de 52,33 kJ. Considerando que a máquina opere por 22 horas diárias, seis dias por semana, nas mesmas condições deste experimento, a energia dissipada seria de 27,6MJ, ou 7,67 kWh equivalente a 1% do total consumido pela máquina.

5.3.1 Cálculo do banco de capacitores do sistema de recuperação de energia

O dimensionamento do banco de capacitores ou supercapacitor está baseado em duas grandezas: a tensão ao qual será submetido e a energia que deve ser armazenada. Como na proposta do barramento em corrente contínua a tensão é variável, o cálculo deste dispositivo será feito a partir dos valores de tensão máxima e mínima assumida por este barramento de

corrente contínua. A tensão mínima adotada para fins de cálculo será de 530 V CC (V_{bar_min}), valor próximo da tensão retificada da rede comercial em 380 V CA. Enquanto, a tensão máxima no barramento em 600 V CC (V_{bar_max}) tensão segura para os componentes eletrônicos do inversor.

Para efeitos de cálculo, foi considerada somente a energia disponível na primeira frenagem, a de maior energia, pois observando todo o período entre as frenagens houve o consumo de energia pelo motor, e se o cálculo fosse efetuado para todo período, o banco ficaria superdimensionado. Assim a eq. (53) mostra o cálculo da capacitância total do banco de capacitores.

$$C = \frac{2 \cdot E_{cap}}{V_{bar_max}^2 - V_{bar_min}^2} \quad (53)$$

Onde:

C é a capacitância do banco ou supercapacitor;

E_{cap} é a energia a ser regenerada em uma frenagem, a maior do ciclo;

V_{bar_max} tensão máxima assumida para o barramento de corrente contínua;

V_{bar_min} tensão mínima do barramento de corrente contínua;

Para a conexão de um número finito de motores ao barramento CC, acrescenta-se à equação o número de motores conectados ao barramento de corrente contínua e a energia gerada por esse grupo de motores nas frenagens, então o valor da capacitância pode ser calculado por (54).

$$C = \frac{2 \cdot E_{reg_max} \cdot N_{motores}}{V_{bar_max}^2 - V_{bar_min}^2} \quad (54)$$

Onde:

E_{reg_max} é a energia máxima a ser regenerada média do grupo;

$N_{motores}$ é a quantidade média de motores desacelerando ao mesmo tempo;

Assim, aplicando-se o valor de maior energia dissipada pela máquina, na primeira frenagem, de 156,14 J, e utilizando a expressão (54), para um número de 2 máquinas, temos o valor da capacitância para o banco calculado em eq. (55):

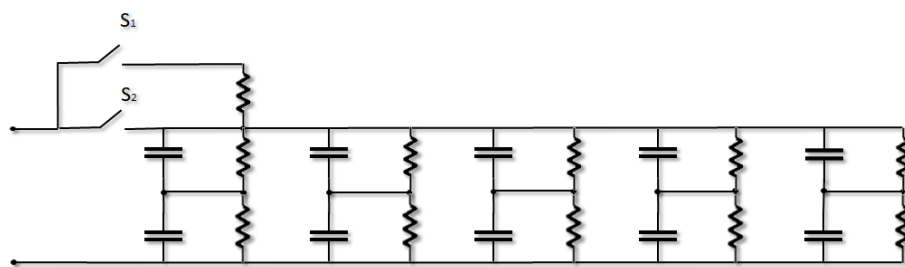
$$C = \frac{2 \cdot E_{reg_max} \cdot N_{motores}}{V_{bar_max}^2 - V_{bar_min}^2} = \frac{2 \cdot 156,14 \cdot 2}{600^2 - 530^2} = 7,89 \text{ mF} \quad (55)$$

Dessa forma, o valor da capacitância a ser utilizado pelo sistema de recuperação de energia será de 7,89 mF. O valor calculado para a capacitância é considerado baixo para

justificar a utilização de um supercapacitor comercial, mesmo em um pequeno agrupamento de máquinas.

Optou-se por utilizar capacitores eletrolíticos agrupados em série e paralelo para formar um banco com o valor dimensionado capaz de armazenar a quantidade de energia calculada nas frenagens da máquina, conforme figura 45. Sendo dois capacitores de $3300\ \mu\text{F}$ x $400\ \text{V}$ em série formando um braço, cada um deles em paralelo com um resistor de $50\ \text{k}\Omega$ e $4\ \text{W}$ conforme o manual do fabricante Epcos; e 5 (cinco) braços iguais em paralelo, perfazendo uma capacitância total de $8,25\ \text{mF}$, maior então que o valor calculado. A esse banco foi adicionado um sistema de pré-carga temporizado com contatoras S_1 e S_2 , que inserem uma resistência em série para promover a carga inicial, antes da conexão direta ao barramento de corrente contínua, evitando correntes de In-rush.

Figura 45: Esquemático do banco de capacitores



Fonte: o autor

A utilização de um banco com capacitores em detrimento à supercapacitores, deve-se ao fato que as capacitâncias mínimas encontradas para supercapacitores comerciais, que podem ser associados para se obter tensões acima de $600\ \text{V}$, estão na faixa de alguns Farads, e só se justificaria para grandes quantidades de energia. Podemos observar pelas medições realizadas que a energia dissipada nos resistores de frenagem é muito pequena. Então, não há razão para a utilização de supercapacitores para essa aplicação. A quantidade de energia varia com o número de paradas necessárias no processo, assim a energia empregada no movimento da máquina pode ser totalmente utilizada para a manufatura de uma peça ou parte sem a necessidade de absorção de energia por parte de um sistema de recuperação. Porém, existem algumas situações em que as paradas de máquina dissipam muita energia, e pode ser necessário a utilização de um SRE que utilize supercapacitores. Como por exemplo, na produção de papéis especiais utilizados pela indústria de impressão, que produzem rolos que podem atingir o peso de algumas toneladas, como o mostrado na figura 46, e que sem uma frenagem mecânica ficariam girando por vários minutos diminuindo a eficiência do processo fabril.

Figura 46: Produção de rolos de papel com 10 m de largura e até 200 m de comprimento para indústria gráfica.



Fonte: www.papier-ausbildung.de/papierindustrie

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a proposta de um barramento em corrente contínua com tensão variável e recuperação de energia. Foi mostrado a necessidade do uso de capacitores no barramento para o armazenamento da energia dissipada nas frenagens proporcionando uma mitigação de picos de tensão no barramento de corrente contínua.

O dimensionamento do sistema de armazenamento de energia foi realizado com os dados experimentais adquiridos nas máquinas de injeção de plástico de uma fábrica de calçados. É importante reforçar que o inversor ao qual o motor está conectado já possui um banco de capacitores, porém esses capacitores não têm valor suficientemente grande ao ponto de conseguir armazenar a energia remanescente.

Foi dimensionado a capacitância necessária para o armazenamento dos blocos de energia dissipada das frenagens, no qual foi constatado que não é necessário a utilização de supercapacitores e sim de um banco de capacitores, o qual atende plenamente às demandas de energia.

6 BARRAMENTO DE CORRENTE CONTÍNUA COM TENSÃO VARIÁVEL, RESULTADOS OBTIDOS NA INDÚSTRIA.

Como foi mostrado ao longo deste trabalho, na maioria dos trabalhos acadêmicos, os barramentos estudados possuem tensão fixa. A proposta de (SHUAI *et al.*, 2018) é de controlar a tensão para aumentar a eficiência e a confiabilidade em uma microrrede contínua. Na sua proposição para manter a tensão utiliza-se um controle com três hierarquias utilizando a teoria do controle hierárquico inteligente. Já (ABBASI; DEHKORDI; SADATI, 2020) propõe a utilização de um esquema de modelo de controle preditivo descentralizado para o controle da tensão de uma microrrede em corrente contínua. Esse controle descentralizado seria mais eficiente para o controle da tensão assumindo uma pequena variação ao longo da rede. No mesmo trabalho reforça a ideia de que as microrredes em corrente contínua são mais eficientes, confiáveis e estáveis que as de barramento em corrente alternada, pois não possuem problemas com harmônicos, sincronização de frequência, desbalanceamento, e controle de tensão e frequência.

Na proposição feita nesse trabalho, tratamos com um barramento CC em que não se exige controle rígido na magnitude da tensão. Todavia, esse barramento deve satisfazer algumas condições de tensão mínima, para a garantia da partida dos motores elétricos conectados aos inversores, bem como um valor máximo de tensão admissível para os componentes eletrônicos dos inversores nela conectados.

Entretanto, uma tensão mínima para a partida dos motores conectados ao barramento CC é necessária para não afetar o funcionamento das máquinas. No caso implementado, essa tensão tem a magnitude de 530 V CC proveniente da alimentação CA de um retificador trifásico conectado em 380 V e que não faz parte desse estudo. A tensão máxima observada no barramento CC é de 600 V, pois essa é uma tensão segura para os inversores encontrados no mercado que podem ser conectados a um barramento CA de 380 V. Alguns inversores de maior potência podem suportar tensões mais altas pois tem semicondutores adequados para estes níveis de tensão. Vale ressaltar, que os cabos elétricos não foram modificados, pois são normatizados na NBR5410:2004, de instalações elétricas de baixa tensão, e possuem tensão de isolamento de 750V em ambiente industrial.

6.1 Resultados experimentais obtidos com o barramento em corrente contínua de tensão variável: ganhos de energia no ambiente industrial.

Com o dimensionamento dos capacitores do sistema de recuperação de energia e montagem do protótipo conforme proposto por (GUEDES, Aderaldo Ricarte, 2018), foram adquiridas novas medições na máquina injetora de plástico GEK 280/S. A figura 47 mostra o banco de capacitores já conectado a injetora e os equipamentos utilizados na medição. Foram adotados os mesmos procedimentos e condições anteriores para a máquina injetora. Porém como a produção é dinâmica e tem mudanças por turnos a peça que se produzia no experimento anterior já não estava mais disponível.

Figura 47: Banco de capacitores e instrumentos de medidas conectados a injetora. 1. Osciloscópio, 2. Ponteira de alta tensão, 3. Amplificador das ponteiras de corrente e 4. Banco de capacitores.



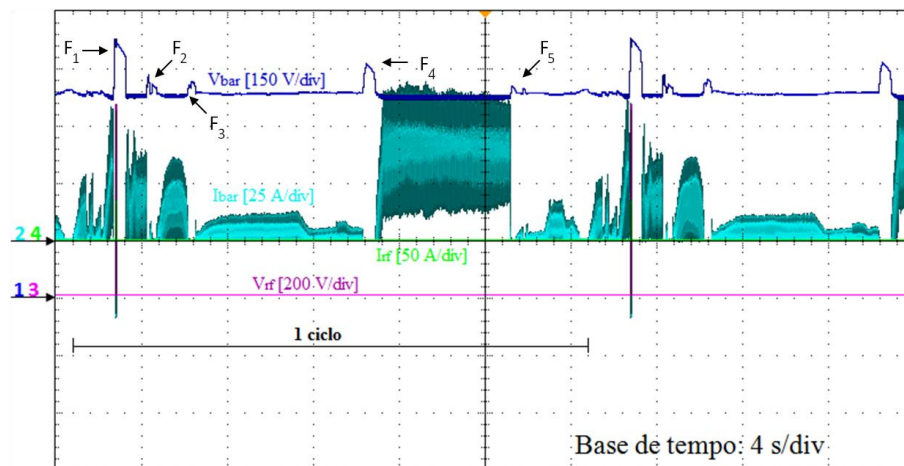
Fonte: autor

As aquisições deste experimento foram obtidas em duas etapas: uma com o banco de capacitores desconectado e outra com a conexão do banco de capacitores ao barramento. Dessa forma é possível mensurar o comportamento do barramento e verificar se são atendidas as condições para o funcionamento normal da máquina.

6.1.1 Medições com o banco de capacitores desconectado do barramento CC.

As medições de corrente e tensão foram exatamente reproduzidas seguindo o padrão adotado nos capítulos anteriores. A máquina injetora estava produzindo peças de PVC com 170 gramas com um ciclo de produção de aproximadamente 24 segundos. O mais importante nessas coletas de dados é que a máquina opere em condições que haja energia sendo deliberadamente desperdiçada, ou seja, atuação dos resistores de freio para “queimar” a energia excedente. A figura 48 mostra as aquisições de tensão e corrente durante todo o ciclo de produção, primeiramente com o banco de capacitores desconectado do barramento de corrente contínua. No período de um ciclo produção, o motor sofreu 5 frenagens, F_1 a F_5 , no entanto, apenas em na primeira frenagem F_1 , o resistor de freio foi acionado. Nas outras frenagens, de F_2 a F_5 , o motor desacelera e retoma a velocidade logo em seguida, consumindo a energia que havia sido entregue ao barramento. Na frenagem F_1 a tensão V_{bar} elevou mais que 20%, saindo de 528,4 V e atingindo 676,7 V. O valor da corrente I_{bar} atingiu valor de 69,66 A e tem uma forma oscilante, como um ruído.

Figura 48: Medições de corrente e tensão em um ciclo completo de injeção de componentes. Sem o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (4 s por div.).

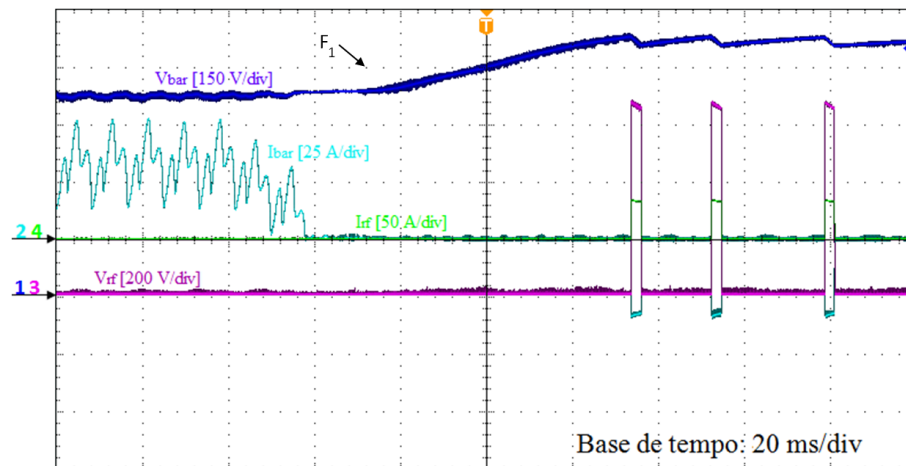


Fonte: autor

O detalhe da frenagem F_1 é mostrado pela figura 49, onde a recuperação de energia ocorre por um breve período. Nessa desaceleração, a tensão do barramento sobe para 686,7 V quando a proteção entra para reduzir essa sobretensão. O tempo total dessa frenagem é de aproximadamente 48 ms. Esse motor tem baixo momento de inércia (0,012 kgm²) então a quantidade de energia que pode ser recuperada é pequena. Em sistemas com altos momentos

de inércia o tempo de desaceleração e a energia dissipada são maiores o que proporciona mais perspectivas de recuperação de energia.

Figura 49: Detalhe da primeira desaceleração, F_1 , do motor sem o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



Fonte: autor

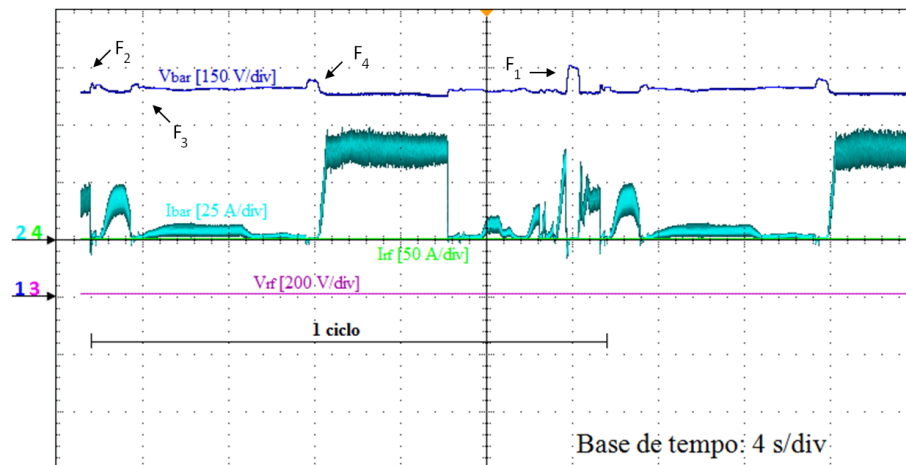
Ainda na figura é interessante ressaltar o comportamento da tensão no barramento, quando há o chaveamento do resistor de freio. O formato que a tensão assume mostra que os capacitores internos do inversor não são calculados para fazer a recuperação da energia vinda dos motores por ele acionado.

6.1.2 Medições feitas com a conexão do banco de capacitores ao barramento de corrente contínua

Depois de conectar o banco de capacitores ao barramento de corrente contínua, seguiu-se com as medições utilizando os mesmos procedimentos na seção anterior. A peça em produção era a mesma, com 170 gramas e com mesmo ciclo de injeção de 24 segundos. As medições de corrente e tensão são mostradas na figura 50, onde se tem um ciclo completo de injeção com todas as frenagens. Pode-se notar que o comportamento da tensão e corrente no barramento foi diferente. Nesse ciclo de produção só são visíveis quatro frenagens, e em nenhuma delas houve a atuação do circuito de proteção por conta das altas elevações de tensão no barramento. Na frenagem F_1 , na qual, sem o banco de capacitores houve a entrada da proteção, pois havia alcançado o valor de 686,7 V, com o banco de recuperação de energia conectado, essa mesma tensão V_{bar} diminuiu, atingindo apenas o valor de 603,4 V. Outro fato interessante aconteceu com a corrente do barramento I_{bar} que diminuiu as oscilações e seu pico,

ficou em 48,84 A. O que sugere que a demanda de corrente feita ao retificador foi menor e se utilizou parte da energia acumulada do barramento.

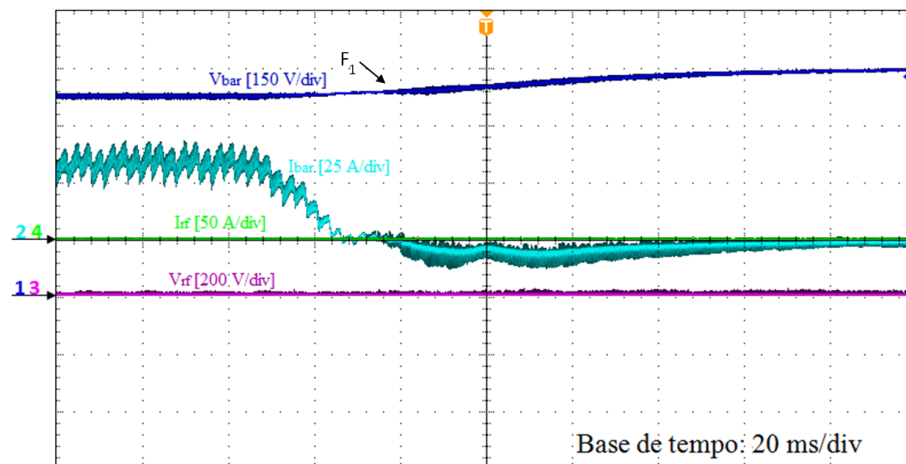
Figura 50: Medições de corrente e tensão em um ciclo completo de injeção de componentes. Com o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (4 s por div.).



Fonte: autor

O detalhe da frenagem F_1 com o capacitor conectado ao barramento de corrente contínua é mostrado na figura 51. A imagem mostra o crescimento da magnitude da tensão V_{bar} no barramento de corrente contínua de forma mais suave, pois a energia está carregando o sistema de armazenamento de energia. A corrente no barramento de corrente contínua I_{bar} é menos oscilante e não há a atuação do sistema de proteção do inversor.

Figura 51: Detalhe da primeira desaceleração, F_1 , do motor com o banco de capacitores acoplado ao barramento CC do inversor. Ch 1 (150 V por div. – azul escuro) – tensão do barramento (V_{bar}), Ch 2 (25 A por div. – azul claro) – corrente do barramento (I_{bar}), Ch 3 (200 V por div. – rosa) – tensão no resistor de frenagem (V_{rf}) e Ch 4 (50 A por div. – verde) – corrente no resistor de frenagem (I_{rf}). Base de tempo: (20 ms por div.).



Fonte: autor

Um resumo com os dados coletados de tensões e correntes foi montada para melhor apresentar os resultados obtidos mostrado na tabela 4.

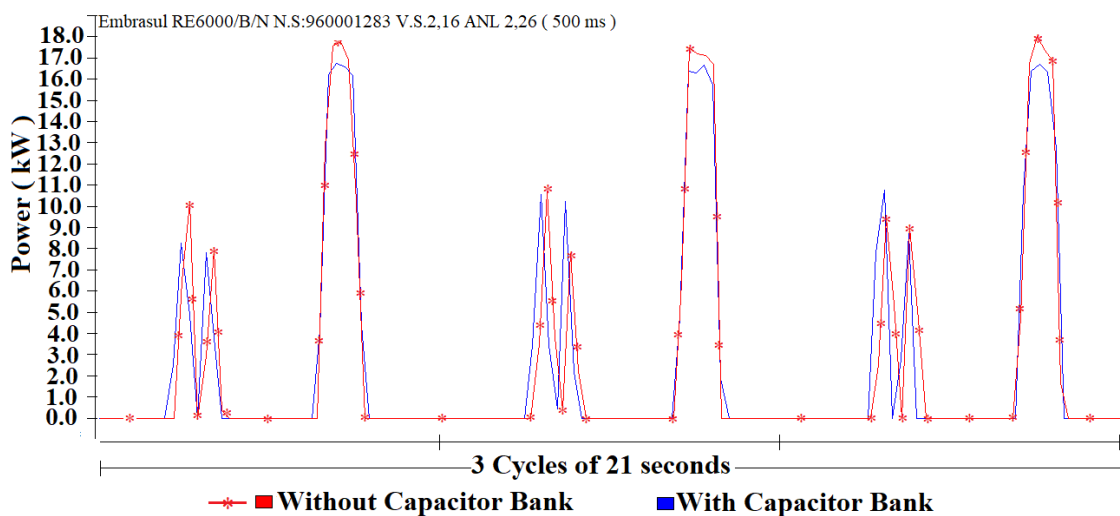
Tabela 4: Resumo de tensões e corrente, V_{bar} e I_{bar} , no barramento de corrente contínua

Estado do banco de capacitores	Resultados nas capturas	V_{bar} Máximo	I_{bar} Máximo	Energia	
				Dissipada	Regenerada
Desacoplado	Figura 46	676,7	69,66	SIM	NÃO
	Figura 47	686,2	52,96	SIM	NÃO
Acoplado	Figura 48	603,4	48,84	NÃO	SIM
	Figura 49	598,3	45,6	NÃO	SIM

Fonte: autor

Com essa tabela é mais fácil de verificar que houve reduções significativas nas tensões e correntes no barramento de corrente contínua, diminuindo de certa forma a demanda de energia vinda do retificador. Essa menor demanda de energia foi verificada pelo analisador de potência colocado no barramento CA na entrada do retificador. Esse analisador de energia foi colocado seguindo o esquemático mostrado na figura 35 do capítulo 5 e esteve conectado à máquina injetora em todo processo de medição. A figura 52 mostra os resultados obtidos com o analisador de potência, que adquiriu os dados durante um turno de 4 horas de trabalho. Na figura é mostrado o resultado de um detalhe de alguns poucos ciclos de produção de peças de PVC, sendo os três sem o banco de capacitores conectado ao barramento de corrente contínua, e depois mais três com a conexão do banco de capacitores à máquina. É importante ressaltar que os ciclos se repetem ao longo de todo período em que foram realizadas as medições.

Figura 52: Comparativo da potência ativa (P_i) durante três ciclos de produção (Sem banco de capacitor – Curva vermelha); (Com banco de capacitor – Curva azul).



Fonte: autor

Os valores médios de energia consumida calculados foram de 6,54 kWh com a máquina operando sem o banco de capacitores e de 6,21kWh quando o banco de capacitores é conectado ao barramento de corrente contínua. Essa diferença é de 5,05 % no consumo de energia nesse processo de produção.

6.2 Considerações parciais

Nesse capítulo foram mostrados os resultados experimentais com o barramento de corrente contínua de tensão variável. Conforme foi visto, a tensão no barramento de corrente contínua pode variar dentro de uma faixa segura, sem causar danos aos componentes dos inversores ou distúrbios no funcionamento das máquinas. Os resultados apontados mostram um ganho de 5,05% no consumo de energia quando colocado no barramento um sistema de recuperação de energia. Este sistema de armazenamento está conectado diretamente ao barramento, sem que necessite a adição de conversores para fazer o controle da energia e que reduziriam a eficiência total do sistema por conta de perdas. Foi visto também que diferentes processos de produção obtêm diferentes ganhos, maiores ou menores dependendo do quanto se tenha de energia a ser recuperada.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma nova concepção para um barramento de corrente contínua com tensão variável para aplicação industrial visando a eficiência energética. Estudos de um barramento de corrente contínua na indústria não são comuns na literatura científica, dando frente para uma ampla margem de pesquisas. Em edificações de telecomunicações e datacenters este barramento já é uma realidade com o uso de tensão **contínua** de 380 V, que já está normatizado. Nesse tipo de edificação e se conseguiu uma redução de até 28% no consumo de energia com a troca do barramento de corrente alternada.

Nesse trabalho um barramento de corrente contínua com tensão variável foi implementado na indústria, na qual testes foram realizados em máquinas de injeção fabricando peças de PVC. Os resultados experimentais mostram que não é só possível a utilização de uma tensão variável no barramento CC, bem como ter uma redução do consumo de energia em relação a fonte primária, comprovado pelas **medições** obtidas com o analisador de energia mostrando um ganho real de 5,05% no processo estudado. Ainda como parte da proposição do barramento CC foi dimensionado e implementado um sistema de recuperação de energia conectado diretamente ao barramento CC sem a utilização de conversores. Assim, a energia que havia sido armazenada durante as frenagens diminuiu consideravelmente as oscilações causadas ao barramento CC durante novas partidas dos motores quando comparadas com as oscilações com o sistema de recuperação de energia desconectado do barramento.

Antes do fechamento final deste trabalho, vale ressaltar alguns percalços que não possuem um local adequado no corpo do texto. À primeira vista, parece fácil encontrar uma empresa que dispunha de uma máquina de alguns milhares de dólares, produzindo peças que seriam comercializadas, para que se pudessem ser feitas mudanças para a realização das medições. A nossa entrada na fábrica foi obtida com negociações entre o Prof. Edilson Mineiro, Aderaldo Guedes, funcionário da empresa e a direção da Grendene S/A que tem papel importante no desenvolvimento da região. Permitida a entrada, ainda nos deu o suporte pessoal e emprestou um par de motores com os respectivos conversores (drivers) para que pudéssemos fazer testes. Num primeiro momento, quando tivemos acesso a uma das máquinas que estava em uma sala de treinamento, mas que fazia parte da produção, nos deparamos com o fato de que nossos equipamentos não conseguiriam fazer leituras de corrente, pois a máquina cedida tinha motores que davam picos de corrente de 350 A, que excedia muito a capacidade de leitura das ponteiras de corrente de 150 A, ficando impraticável todas as medições. Como era uma sala mais reservada, com duas máquinas operando, seria mais fácil a aquisição das medições pois

não teríamos tráfego de pessoas entre elas. Tivemos que solicitar a mudança para uma máquina menor, a qual pudéssemos fazer as medições. Porém, a máquina cedida estava dentre outra centena operando no chão de fábrica, o que exigiu o acompanhamento da comissão interna de prevenção de acidentes. Por fim, no início de 2020 veio a pandemia da COVID-19 que impossibilitou por restrições de acesso e lockdown, que conectássemos um grupamento maior de motores ao barramento contínuo, com o qual teríamos outros dados e possibilidades ainda maiores para outros trabalhos.

Esse texto fica mais adequado em uma sessão de agradecimento à empresa, etc, etc.

A conclusão não está adequada. Você precisa concluir abordando, de forma geral, todos os capítulos e assim fazer uma conclusão do seu trabalho mencionando as dificuldades e resultados positivos obtidos.

Veja seu resumo no início da tese. Parte do resumo pode ser incluído aqui na conclusão.

Seja “conclusivo” na conclusão da tese.

8 TRABALHOS FUTUROS

Existem muitos caminhos que podem ser tomados a partir deste trabalho. Destacamos que o barramento variável em corrente contínua abre um novo caminho a se pensar na redução do consumo de energia. Como primeiro passo seria a implantação em um grupo de máquinas. A partir dessa operação se verificar o ganho de energia comparando com um mesmo grupo em corrente alternada. Outro ponto a se verificar é a utilização do barramento em corrente contínua com tensão variável com outros equipamentos conectados, como por exemplo a iluminação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB / HITACHI. **The Gotland HVDC link**. [s. d.]. Página da Web. Disponível em: https://www.hitachiabb-powergrids.com/cn/zh_cn/references/hvdc/zhangbei1111. Acessado em: 26 set. 2021.

ABBASI, M.; DEHKORDI, N. M.; SADATI, N. **Decentralized Model Predictive Voltage Control of Islanded DC Microgrids**. 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, PEDSTC 2020, 2020. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC49159.2020.9088498>.

ABDULLAH, M. A.; YATIM, A. H. M.; TAN, C. W.; SAMOSIR, A. S. **Control of a bidirectional converter to interface ultracapacitor with renewable energy sources**. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, p. 673–678, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505752>.

AILEE, G.; TSCHUDI, W. **Edison Redux**. IEEE Power and Energy Magazine, n° October 2012, p. 50–59, 2012.

AKIYOSHI, H.; HIRAKI, E.; TANAKA, T.; OKAMOTO, M.; MATSUO, T.; OCHI, K. **Peak power shaving of an electric injection molding machine with supercapacitors**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, n° 2, p. 1114–1120, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2272433>.

AUGUSTINE, S.; MISHRA, M. K.; NARASAMMA, N. L. **Proportional droop index algorithm for load sharing in DC microgrid**. 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2014 [...]. [S. l.: s. n.], 2014. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2014.7042025>.

BARTLOMIEJCZYK, M.; MIRCHEVSKI, S. **Reducing of energy consumption in public transport - Results of experimental exploitation of super capacitor energy bank in Gdynia trolleybus system**. 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014, p. 94–101, 2014. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980616>.

BECKER, D. J.; SONNENBERG, B. J. **DC microgrids in buildings and data centers**. 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), p. 1–7, 2011. DOI 10.1109/INTLEC.2011.6099725. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6099725>.

BELSON, A. **HVDC: The Transverter**, 1922 - ECN Electrical Forums. 2007. Disponível em: <https://www.electrical-contractor.net/forums/ubbthreads.php/ubb/printthread/Board/17/main/18352/type/thread.html>. Acessado em: 20 set. 2021.

BERMANN, C. **Crise ambiental e as energias renováveis**. 2008. Ciencia e Cultura. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2008/ArtigosdePeriodicos/bermanncrise.pdf>. Acessado em: 27 set. 2018.

BODI, F.; LIM, E. H. **380/400V DC powering option**. INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings), 2011. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2011.6099885>.

BONANOMI, A. **Electric Motors: Market Trends and Service Business**. 2016. Power Transmission World. DOI Issn 22802045. Disponível em: <https://www.powertransmissionworld.com/electric-motors/>. Acessado em: 15 ago. 2018.

BRITANICA ENCYCLOPEDIA. **Peter Cooper Hewitt, American electrical engineer**. Britannica. [s. d.]. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Peter-Cooper-Hewitt>. Acessado em: 26 set. 2021.

BRODAY, G. R.; NASCIMENTO, C. B.; AGOSTINI, E.; LOPES, L. A. C. **A Tri-State Bidirectional Buck-Boost Converter for a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications**. 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), , p. 1–6, out. 2015. DOI 10.1109/VPPC.2015.7352888. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7352888/>.

CALVERLEY, J. E.; HIGHFIELD, W. E. **Apparatus for Transforming Electrical Energy**. United States: Patent number: US1580554, 1920. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/92/df/76/88077d57fac866/US1580554.pdf>.

CARMELI, M. S.; DEZZA, F. C.; MAURI, M.; PIEGARI, L. **Energy recovery and efficiency optimisation in a wood cutting machines**. 4th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2013, p. 524–528, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2013.6586903>.

CARPENTER, G. W. **Liquid rectifier**. United States: Patent number: US1671970, 1928. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US1671970>.

CONG WANG; JAIN, P. **A quantitative comparison and evaluation of 48V DC and 380V DC distribution systems for datacenters**. set. 2014. 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC) [...]. [S. l.]: IEEE, set. 2014. p. 1–7. DOI 10.1109/INTLEC.2014.6972112. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6972112/>.

DE ANDRADE, L.; DE LEO, T. P. **A brief history of direct current in electrical power systems**. 3rd Region-8 IEEE History of Electro - Technology Conference: The Origins of Electrotechnologies, HISTELCON 2012 - Conference Proceedings, 2012. <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2012.6487566>.

DRAGICEVIC, T.; LU, X.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M. **DC Microgrids - Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, n° 7, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2478859>.

DRAGICEVIC, T.; LU, X.; VASQUEZ, J.; GUERRERO, J. **DC Microgrids - Part II: A Review of Power Architectures, Applications and Standardization Issues**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 8993, n° c, p. 1–1, 2015. DOI 10.1109/TPEL.2015.2464277. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7177102>.

DRAGICEVIC, T.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M.; SKRLEC, D. **Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks**. IEEE Electrification Magazine, vol. 2, n° 1, p. 54–65, mar. 2014. DOI 10.1109/MELE.2013.2297033. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6774539/>.

ELSAYED, A. T.; MOHAMED, A. A.; MOHAMMED, O. A. **DC microgrids and distribution systems: An overview**. *Electric Power Systems Research*, vol. 119, p. 407–417, 2015. DOI 10.1016/j.epsr.2014.10.017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779614003885>.

ENEL BRASIL. **Fornecimento de energia elétrica em alta tensão - Especificação Técnica 124. Enel Ceara, Fortaleza, nº Versão 02, p. 36, 2019**. Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/ce/documentos/CNC-OMBR-MAT-18-0124-EDCE.pdf>. Acessado on: 8 nov. 2021.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2050 - Demanda de Energia**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. Disponível em: http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA_13-14_Demanda_de_Energia_2050.pdf.

FAIRLEY, P. **DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View]**. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, nº 6, p. 104–103, 2012. DOI 10.1109/mpe.2012.2212617. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6331742>.

GEARY, D. E. **“Blinded by the light” Visualizing the future with direct current for Data Centers and dc current Microgrids**. 2015. dcFUSION, llc. Disponível em: <https://www.psama.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-energy-efficiency/presentations/is135-380v-dc-power-data-centers-micro-grids.pdf>. Acessado on: 25 nov. 2020.

GERBER, D. L.; GHATPANDE, O. A.; NAZIR, M.; HEREDIA, W. G. B.; FENG, W.; BROWN, R. **Electrical measurement and verification of energy in DC buildings**. 2021 IEEE 4th International Conference on DC Microgrids, ICDCM 2021, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICDCM50975.2021.9504609>.

GERBER, D. L.; LIOU, R.; BROWN, R. **Energy-saving opportunities of direct-DC loads in buildings**. *Applied Energy*, vol. 248, nº April, p. 274–287, 2019. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.04.089. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.089>.

GERBER, D. L.; VOSSOS, V.; FENG, W.; KHANDEKAR, A.; MARNAY, C.; NORDMAN, B. **A simulation-based comparison of AC and DC power distribution networks in buildings**. 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), p. 588–595, 2017. DOI 10.1109/ICDCM.2017.8001107. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8001107/>.

GOTTBERG, O.; KAJASTE, J.; MINAV, T.; KAURANNE, H.; CALONIUS, O.; PIETOLA, M. **Energy Balance of Electro-Hydraulic Powertrain in a Micro Excavator**. jul. 2018. 2018 Global Fluid Power Society PhD Symposium, GFPS 2018 [...]. [S. l.]: IEEE, jul. 2018. p. 1–6. DOI 10.1109/GFPS.2018.8472368. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8472368/>.

GRENIER, D.; LOUIS, J. P. **Modeling for control of non-sinewave permanent-magnet synchronous drives by extending Park's transformation**. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 38, nº 4–6, p. 445–452, 1995. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(95\)00053-Z](https://doi.org/10.1016/0378-4754(95)00053-Z).

GUEDES, Aderaldo R.; FERREIRA, J. S.; LIMA, A. dos S.; FREITAS, A. A. A.; ANTUNES, F. L. M.; SA, E. M. **DC bus, an attractive opportunity for energy efficiency in industry**. abr. 2017. 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) [...]. [S. l.]: IEEE, abr. 2017. p. 1–5. DOI 10.1109/PEDG.2017.7972508. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7972508/>.

GUEDES, Aderaldo Ricarte. **Microrrede industrial em corrente contínua, uma oportunidade atrativa para eficiência energética**. 2018. 115 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceara, Sobral, 2018.

HAHASHI, Y.; MINO, M. **High-density bidirectional rectifier for next generation 380-V DC distribution system**. Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, p. 2455–2460, 2012. <https://doi.org/10.1109/APEC.2012.6166166>.

HAKALA, T.; LAHDEAHO, T.; JARVENTAUSTA, P. **Low-Voltage DC Distribution-Utilization Potential in a Large Distribution Network Company**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, n° 4, p. 1694–1701, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398199>.

HEWITT, C. P. **Directional Current Arrester**. [S. l.]: Patent number: US1110546, 1903. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/14/47/64/9d2ab3725d5124/US1110546.pdf>.

HIJAZI, A.; BIDEAUX, E.; VENET, P.; CLERC, G. **Electro-thermal sizing of supercapacitor stack for an electrical bus: Bond graph approach**. 2015 10th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2015, 2015. <https://doi.org/10.1109/EVER.2015.7112988>.

IANNUZZI, D.; PIGHETTI, P.; TRICOLI, P. **A study on stationary supercapacitor sets for voltage droops compensation of streetcar feeder lines**. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS 2010, 2010. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2010.5665196>.

IEA. **Key world energy statistics**. [S. l.]: OECD, 2018(Key World Energy Statistics). DOI 10.1787/key_energ_stat-2018-en. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/>.

JAHMEERBACUS, M. I. **Investigation of performance degradation of vector controlled single-phase induction motor drive under rotor time-constant variations**. 2020 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering, ELECOM 2020 - Proceedings, p. 168–172, 25 nov. 2020. <https://doi.org/10.1109/ELECOM49001.2020.9297007>. Acessado em: 8 nov. 2021.

KAKIGANO, H.; MIURA, Y.; ISE, T. **Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high-quality distribution**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, n° 12, p. 3066–3075, 2010. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2077682>.

KARATZAFERIS, I.; TATAKIS, E. C.; PAPANIKOLAOU, N. **Investigation of Energy Savings on Industrial Motor Drives Using Bidirectional Converters**. IEEE Access, vol. 5, p. 17952–17961, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2748621>.

KERSLAKE, B. A.; MAHMOUDI, A.; KAHOURZADE, S. **Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor versus Induction Motor: Technical, Environmental and Economical Considerations**. Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition - Asia, ECCE Asia 2021, p. 857–864, 2021. <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479424>.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; OCONNELL, T. C.; HASAN, M. **Tesla's Contribution to Electric Machine Analysis**. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, n° 2, p. 591–598, 2017. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2640018>.

KUMAR, J.; AGARWAL, A.; AGARWAL, V. **A review on overall control of DC microgrids**. Journal of Energy Storage, vol. 21, n° September 2018, p. 113–138, 2019. DOI 10.1016/j.est.2018.11.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.013>.

LAMME, B. G. **The story of the induction motor**. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 40, n° 3, p. 203–223, 2013. <https://doi.org/10.1109/joaiee.1921.6592844>.

LASSETER, B. B. Lasseter. **Microgrids [distributed power generation]**. in Proc. IEEE, Power Eng. Soc. Winter Meeting. Conf., vol. 1, Jan. 2001, pp. 146–149.

LIMA, A. D. S.; GUEDES, A. R.; FREITAS, A. A. A.; SÁ, E. M.; ANTUNES, F. L. M. **DC bus to industry a new way towards energy efficiency**. 2017. PCIM Europe 2017 - International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management [...]. [S. l.: s. n.], 2017. <https://doi.org/10.1109/SBMicro.2017.7990919>.

LIN, X. F.; XUE, Y. Z.; SONG, C. N.; SONG, S. J.; LIU, B. **An experiment and research platform for DC micro-grid**. Chinese Control Conference, CCC, vol. 2016-Augus, p. 8588–8595, 2016. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2016.7554727>.

MARFOLI, A.; DINARDO, M.; DEGANI, M.; GERADA, C.; JARA, W. **Squirrel Cage Induction Motor: A Design-Based Comparison Between Aluminum and Copper Cages**. IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 2, n° March, p. 110–120, 2021. <https://doi.org/10.1109/ojia.2021.3073820>.

MCKERRACHER, C.; O'DONOVAN, A.; ALBANESE, N.; SOULOPOULOS, Dr. N.; DOHERTY, D.; BOERS, M.; FISHER, R.; CANTOR, C.; FRITH, Dr. J.; MI, S.; GRANT, A.; LYU, J.; AMPOFO, Dr. K.; ABRAHAM, A. T. **Electric Vehicles Outlook - EVO 2021**. 2021. Bloomberg NEF. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>. Acessado em: 19 out. 2021.

MHANKALE, S. E.; THORAT, A. R. **Droop Control Strategies of DC Microgrid: A Review**. Proceedings of the 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies, ICCTCT 2018, 27 nov. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCTCT.2018.8550854>. Acessado em: 24 out. 2021.

MINAV, T. A.; PYRHONEN, J. J.; LAURILA, L. I. E. **Permanent Magnet Synchronous Machine Sizing: Effect on the Energy Efficiency of an Electro-Hydraulic Forklift**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, n° 6, p. 2466–2474, jun. 2012. DOI 10.1109/TIE.2011.2148682. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5759081/>.

MINAV, T.; HÄNNINEN, H.; SINKKONEN, A.; LAURILA, L.; PYRHÖNEN, J. **Electric or Hydraulic Energy Recovery Systems in a Reach Truck— A Comparison**. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, vol. 60, n° 4, p. 232–240, 15 abr. 2014. DOI 10.5545/sv-jme.2013.1581. Disponível em: <http://www.sv-jme.eu/article/electric-or-hydraulic-energy-recovery-systems-in-a-reach-truck-a-comparison/>.

MORSTYN, T.; HREDZAK, B.; AGELIDIS, V. G. **Cooperative Multi-Agent Control of Heterogeneous Storage Devices Distributed in a DC Microgrid**. IEEE Transactions on Power Systems, , p. 1–13, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2469725>.

MOUSSA, S.; GHORBAL, M. J. ben; SLAMA-BELKHODJA, I. **Bus voltage level choice for standalone residential DC nanogrid**. Sustainable Cities and Society, vol. 46, n° June 2018, p. 101431, 2019. DOI 10.1016/j.scs.2019.101431. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101431>.

MURPHY, J. **Understanding AC induction , permanent magnet and servo motor technologies: Operation, Capabilities and Caveats**. 2012. Grafton, WI: Leeson. Disponível em: http://www.leeson.com/documents/PMAC_Whitepaper.pdf. Acessado on: 9 jul. 2018.

NEJABATKHAH, F.; LI, Y. W. **Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, n° 12, p. 7072–7089, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2384999>.

OLIVEIRA, F.; UKIL, A. **Comparative Performance Analysis of Induction and Synchronous Reluctance Motors in Chiller Systems for Energy Efficient Buildings**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, n° 8, p. 4384–4393, 1 jan. 2019. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2890270>. Acessado em: 8 nov. 2021.

OLIVER, A. S. **Addressing 400-Vdc power in advanced industrial and data-center apps**. 2014. Disponível em: <http://www.powersystemsdesign.com/addressing-400-vdc-power-in-advanced-industrial-and-data-center-apps>. Acessado on: 4 dez. 2018.

PARLAMENTO EUROPEU. **Diretiva 2006/95/CE. 2006**. Jornal Oficial da União Europeia. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0095&from=EN>. Acessado on: 19 abr. 2021.

PHASE USA INC. **U3 ServoMotors**. p. 64, [s. d.]. Disponível em: <http://www.phaseusa.us/ultract-3-servo.html>.

QUEIROZ, E. D.; POMILIO, J. A. **PMSM drive system with variable DC bus for EV regenerative braking**. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2016, n° 3, 2017. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2016.7874507>.

RAI, K.; SEKSENA, S. B. L.; THAKUR, A. N. **Economic Efficiency Measure of induction motors for industrial applications**. International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 7, n° 4, p. 1661–1670, 2017. <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i4.pp1661-1670>.

RUDERVALL, R.; CHAPENTIER, J.; RAGHUVVEER SHARMA. **High voltage direct current (HVDC) transmission systems technology review paper**. 2000. Energy Week [...]. Washington, DC: Energy Week, 2000. p. 1–19. Disponível em: http://www2.internetcad.com/pub/energy/technology_abb.pdf. Acessado em: 28 set. 2021.

RUFER, A.; HOTELLIER, D.; BARRADE, P. A **supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, n° 2, p. 629–636, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.824408>.

RYU, M.-H.; KIM, H.-S.; BAEK, J.-W.; KIM, H.-G.; JUNG, J.-H. **Effective Test Bed of 380-V DC Distribution System Using Isolated Power Converters**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, n° 7, p. 4525–4536, 2015. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2399273>.

SAEEDIFARD, M.; GRAOVAC, M.; DIAS, R. F.; IRAVANI, R. **DC power systems: Challenges and opportunities**. Power and Energy Society General Meeting 2010 IEEE, , p. 1–7, 2010. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589736>.

SHUAI, Z.; FANG, J.; NING, F.; SHEN, Z. J. **Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, n° 2, p. 3670–3682, 2018. DOI 10.1016/j.rser.2017.10.096. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.096>.

SIEMENS MOBILITY GMBH. **Background Information: eHighway – the backbone for electrified freight transport by road**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: www.siemens.com/press/ehighway. Acessado em: 4 out. 2021.

STANA, G.; BRAZIS, V. **Trolleybus with ESS motion simulation considering mass increase and transmission losses**. 2017. 2017 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) [...]. [S. l.]: IEEE, 2017.

SUNTIO, T.; PUUKKO, J.; NOUSIAINEN, L.; MESSO, T.; HUUSARI, J. **Change of paradigm in power electronic converters used in renewable energy applications**. 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), p. 1–9, 2011. DOI 10.1109/INTLEC.2011.6099800. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6099800>.

SURYANARAYANA, H.; SUDHOFF, S. D. **Design Paradigm for Power Electronics-Based DC Distribution Systems**. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, n° 1, p. 51–63, 2017. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2626458>.

TAKAHASHI, K.; OKAMOTO, M.; HIRAKI, E.; TANAKA, T. **Simulation analysis of energy-saving effect of an energy recovery system for electric motor drive system in the injection molding machine**. Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, p. 118–122, 2010. DOI 10.1109/EPEPEMC.2010.5606863. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5606863>.

THEISEN, P. A **DC Switching Renaissance**. 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, p. 55, 2010. Disponível em: <http://www.ieee-holm.org/h2010/h2010Theisen.pdf>. Acessado on: 25 nov. 2018.

THOMAS, B. A. **Edison revisited: Impact of DC distribution on the cost of LED lighting and distributed generation**. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), , p. 588–593, 2010. DOI 10.1109/APEC.2010.5433612. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5433612>.

TON, M.; FORTENBURY, B.; TSCHUDI, W. **DC Power for Improved Data Center Efficiency**. Power, n° March, 2008. Disponível em: <https://datacenters.lbl.gov/resources/dc-power-improved-data-center-efficiency>. Acessado on: 19 maio 2019.

UMAMAHESWARARAO, V.; SUMAN, M.; CHANDAN, C.; BIKASH, C. P. **A Series Voltage Regulator for the Radial DC Microgrid**. IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, vol. 10, n° 1, p. 127–136, 2019. .

VIRIYAUTSAHAKUL, W.; PANACHAROENWONG, W.; PONGPIRIYAKIJKUL, W.; KOSOLSAKSAKUL, S.; NAKAWIRO, W. **A Simulation Study of Inverter Air Conditioner Controlled to Supply Reactive Power**. Procedia Computer Science, vol. 86, p. 305–308, 2016. DOI: 10.1016/j.procs.2016.05.083. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.083>.

VOSSOS, V.; GERBER, D.; BENNANI, Y.; BROWN, R.; MARNAY, C. **Techno-economic analysis of DC power distribution in commercial buildings**. Applied Energy, vol. 230, n° May, p. 663–678, 2018. DOI 10.1016/j.apenergy.2018.08.069. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.069>.

WAFFENSCHMIDT, E. **Low Voltage DC Grids Effort for AC to DC conversion**. 1., 2013. 35th International Telecommunication Energy Conference - INTELEC 2013 [...]. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2013. vol. 1, p. 646–651.

WATSON, N. R.; WATSON, J. D. **An overview of HVDC technology**. *Energies*, vol. 13, nº 17, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13174342>.

WEG. **Motores Elétricos - Guia de Especificação**. 2015. Disponível em: www.weg.net. Acessado on: 24 ago. 2018.

WEI, B.; DING, S.; FANG, J.; HANG, J.; WANG, Q. **A wavelet-fuzzy power allocation strategy of battery-supercapacitor hybrid system for electric vehicles**. maio 2018. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) [...]. [S. l.]: IEEE, maio 2018. p. 2095–2099. DOI 10.1109/ICIEA.2018.8398055. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8398055/>.

XU, J.; YANG, J.; GAO, J. **An integrated kinetic energy recovery system for peak power transfer in 3-DOF mobile crane robot**. 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2011, p. 330–335, 2011. <https://doi.org/10.1109/SII.2011.6147469>.

YAROSLAVTSEV, M. v. **Increasing the Length of Trolleybus Contact Line Sections by Installation of Stationary Energy Storage Posts**. 2018. 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) [...]. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 6403–6406. <https://doi.org/10.1109/EDM.2018.8435080>.

YU, C. Y.; TAMURA, J.; LORENZ, R. D. **Control method for calculating optimum DC bus voltage to improve drive system efficiency in variable DC bus drive systems**. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012, nº 1, p. 2992–2999, 2012. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342361>.

ZHANG, X. **Commercial applications of microgrid technology in contract energy management**. 2018. Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2018 [...]. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 1654–1658. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8397975>.

ANEXO I

Esquemático da simulação

