



# APLICAÇÕES NÃO CONVENCIONAIS DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA<sup>1</sup>

Estudo de caso: Sistema de Basculamento de Carro Torpedo na Aciaria da ArcelorMittal Tubarão

Paulo Henrique Zanandrea<sup>2</sup>  
Mário Sergio Di Grazia<sup>3</sup>

## Resumo

Atualmente, os inversores de frequência (*Variable Speed drives – VSD*) são muito utilizados em vários processos industriais. Entretanto, quase sempre em aplicações tradicionais. Este trabalho descreve a aplicação implementada com sucesso pela ArcelorMittal Tubarão de um sistema que utiliza inversor de frequência para o basculamento dos carros torpedo da Aciaria. Tal sistema é capaz de operar em condição normal e também na condição de emergência - durante uma falta de energia. O basculamento dos carros torpedo é feito utilizando um motor de indução trifásico de 440 VAC. Durante ocorrência de falta de energia, o inversor passa a ser alimentado por um banco de baterias (456 VDC), com o intuito de colocar o sistema na posição de segurança (vertical). É apresentada a nova topologia para este sistema, descrevendo as técnicas empregadas, os benefícios e os resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Sistema de emergência; Carro torpedo; Inversores de frequência.

## NON-CONVENTIONAL APPLICATION OF AC DRIVES

Case study: Tilting system of torpedo car in ArcelorMittal Tubarão BOF Shop

## Abstract

Nowadays, Variable Speed Drives (VSD's) are very often used in many industrial systems, but almost always in traditional applications. This paper describes the successful application of VSD's in the ArcelorMittal Tubarão torpedo car tilting system in the Basic Oxygen Furnace –BOF (steelmaking plant), in normal operation condition and also in emergency system condition – during blackouts. The electrical system uses a 440 VAC three-phase induction motor. During a blackout, the VSD is fed by DC accumulators – battery bank (456 VDC) in order to put the system in a safety position. It is presented the new topology for this system, describing the techniques employed, the benefits and the latest results.

**Key words:** Emergency system; Pig iron; Torpedo car; Variable speed drive.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> M.Sc Engenheiro Eletricista – ArcelorMittal Tubarão

<sup>3</sup> Engenheiro Eletricista – Diretor Técnico da Yaskawa Elétrico do Brasil Ltda



## 1 INTRODUÇÃO

Em muitas aplicações industriais a operação ininterrupta do processo é essencial para garantir a segurança para pessoas, processo e equipamento, em caso de falta de energia elétrica (blecaute) da fonte primária.

Nestes casos, é fundamental instalar sistemas adicionais para controle e operação dos equipamentos. Soluções tradicionais são freqüentemente usadas, tais como:

- sistema redundante ou em duplicidade (fonte e motor);
- alimentação elétrica redundante em Centros de Controle de motores (CCM) – em caso de manutenção ou falha na fonte primária;
- fonte AC com UPS redundante - freqüentemente utilizada para sistemas de controle;
- soluções mecânicas para sistemas de acionamento - hidráulicos ou pneumáticos; e
- sistema de acionamento elétrico opcional com características operacionais reduzidas – usado para colocar o sistema em uma condição de segurança - um motor pequeno de corrente contínua (C.C.) é normalmente usado.

Nenhuma das soluções descritas acima era adequada para o sistema de acionamento de carro torpedo.

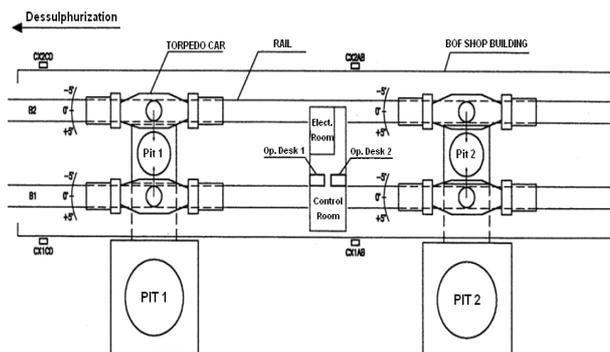
## 2 ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE CARRO TORPEDO DA ARCELORMITTAL TUBARÃO

A Aciaria (*BOF – Basic Oxygen Furnace*) recebe o ferro gusa líquido produzido nos alto-fornos 1, 2 e 3 e o converte em aço, através de uma reação química de oxidação-redução.

No início do processo da Aciaria, o Gusa existente dentro dos carros torpedo - capacidade de 450 t (Figura 1) é basculado lentamente em uma panela existente no piso inferior (dois poços - Figura 2), até que atinja o peso correspondente, de acordo com a receita do aço a ser produzido (valor médio de carga da panela igual a 315 t.). A Figura 3 mostra as vistas de basculamento do carro torpedo, perto do carro torpedo e na mesa da operação (piso superior).



**Figura 1** – Carro Torpedo e locomotiva.



**Figura 2** – Lay-out da planta de basculamento de carro torpedo na aciaria – mostrando os dois poços.



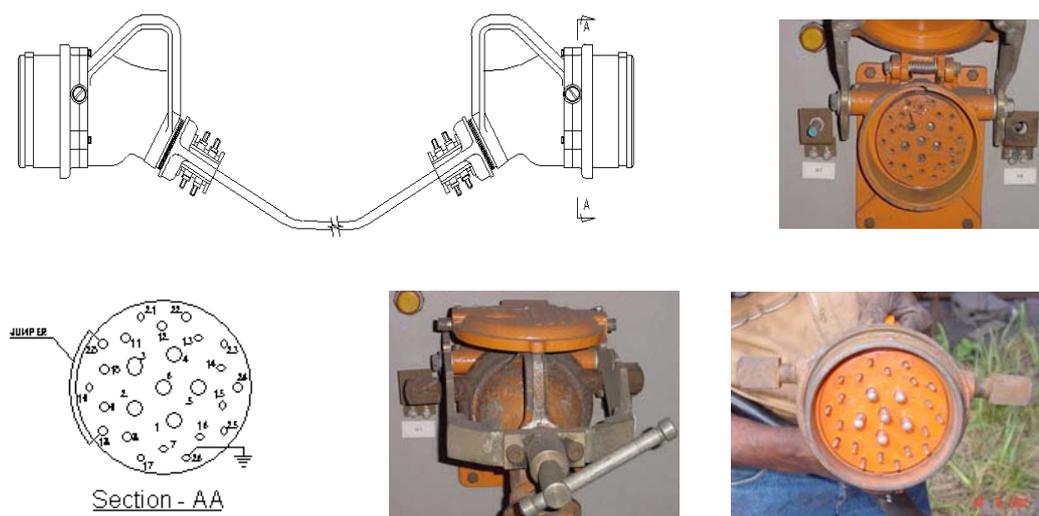
(a)



(b)

**Figura 3** – Vistas do Carro Torpedo, próximo ao carro (a) e da mesa de operação (b).

A conexão elétrica do sistema elétrico ao carro torpedo é feita por cabo e plugues, como mostrado na Figura 4.



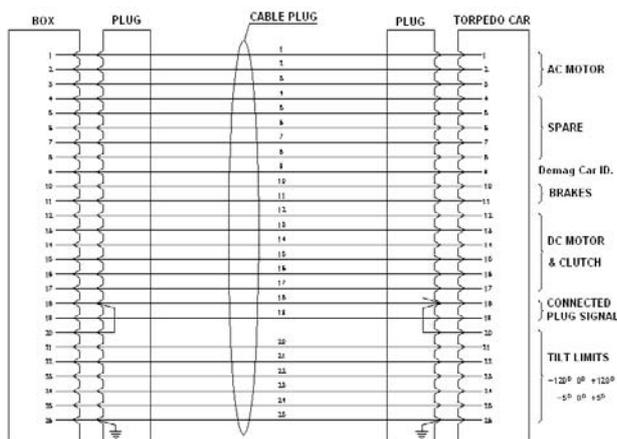
**Figura 4** – Plugues (macho e fêmea) para conexão.

Atualmente, a ArcelorMittal Tubarão possui em sua planta de operação 22 carros torpedo.



O sistema principal de basculamento do carro torpedo é feito por um motor de indução trifásico (30 CV - 60 Hz - 440 VAC).

Além do motor principal, em todos os carros torpedo, há um motor de corrente contínua para ser utilizado como alternativa, em caso de falha do motor de C.A. Este motor C.C. (3 CV - 220 V) bascula o carro torpedo com uma velocidade muito baixa (aproximadamente 10% da velocidade nominal do motor AC). As funções do cabo do plugue são mostradas na Figura 5.



**Figura 5** – Plugues e suas funções – conexão da caixa de junção ao Carro Torpedo.

Na ArcelorMittal Tubarão, há 10 sistemas de basculamento, situados em 7 pontos diferentes:

- Oficina de Refratário;
- Oficina de Caldeiraria;
- Oficina de Carros e Trens;
- Pátio de Escória;
- Pátio de Limpeza (3 sistemas);
- Máquina de Moldar Gusa; E
- Pesagem de gusa da Aciaria (2 sistemas) – na qual o sistema de emergência é necessário.

A - Situação anterior (antes da modificação)

Eletricamente, há dois tipos diferentes (modelos) de carros torpedo, com características diferentes:

- Carros convencionais (Carros Cobrasma)  
Dezesseis carros – fornecidos pela empresa Cobrasma, com as seguintes características:
  - Operação normal: motor AC trifásico de rotor bobinado – sistema de partida com exclusão de resistências;
  - Operação de Emergência: Motor DC.

O diagrama apresentado na Figura 6 descreve o sistema de acionamento elétrico dos carros torpedo da Cobrasma (anterior à reforma).

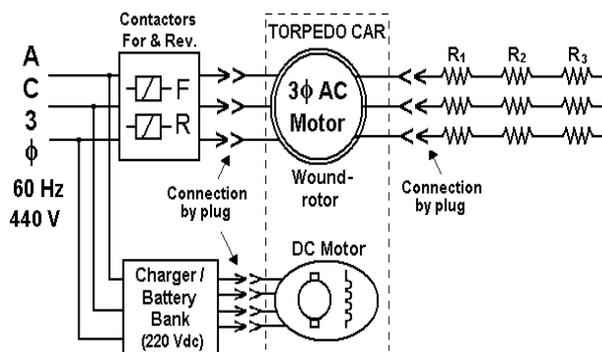


Figura 6 – Sistema de acionamento do carro Cobrasma (sistema convencional).

- Carros acionados por inversor de frequência (VSD) – (Carros Demag)  
Seis novos carros torpedo - fornecidos pela empresa Demag, com as seguintes características:
  - Operação normal: Motor AC trifásico de rotor gaiola acionado por inversor de frequência (VSD) embarcado na cabine do carro torpedo.
  - Operação de Emergência: Motor DC

O diagrama abaixo (Figura 7) mostra a configuração elétrica para o sistema de carros torpedo da Demag.

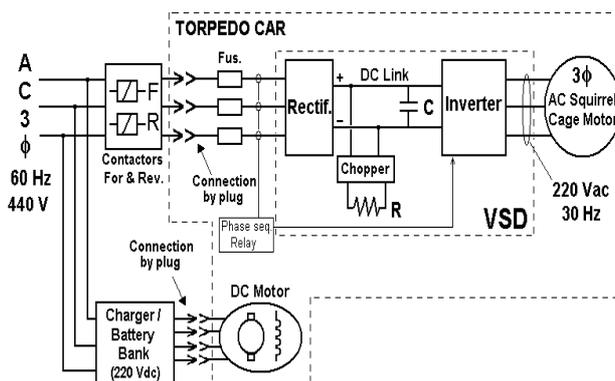


Figura 7 – Sistema de Acionamento do carro Demag (sistema com inversor embarcado).

Nota: O sistema trabalha com frequência de 30 Hz, fornecida pelo inversor.

#### B – Situação atual (após modificação)

Após a reforma do sistema de acionamento, ambos os modelos de carros torpedo trabalham da mesma maneira (com a mesma velocidade final). Para tanto, há dois conjuntos diferentes de parâmetros no inversor. O inversor reconhece o tipo do carro que está conectado (Cobrasma ou Demag) e seleciona a frequência correta de saída para o sistema manter a mesma velocidade final:

- Carro Torpedo Cobrasma: 60 Hz.
- Carro Torpedo Demag: 30 Hz.

A seleção da velocidade é feita por uma entrada digital do inversor, que está no nível "1" para carros Demag e "0" para carros Cobrasma (cabo #9 - Figura 5).



- Carros Convencionais (Carros Cobrasma)

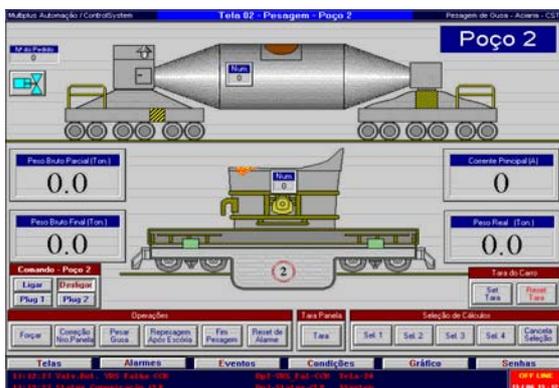
Os motores de rotor bobinado tiveram seus rotores curto-circuitados. Os motores estão sendo gradualmente substituídos por novos motores, de rotor gaiola.

- Carros Demag

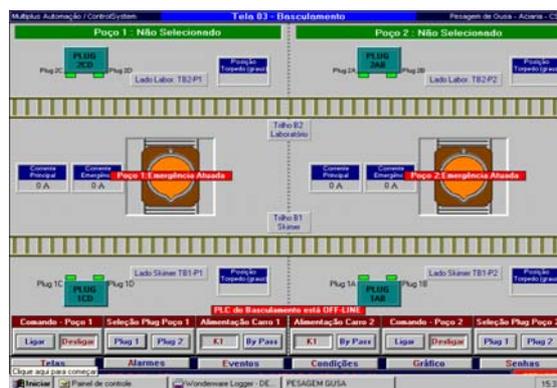
Os inversores localizados dentro dos carros torpedo foram removidos.

### 3 SISTEMA DE CONTROLE

O controle do sistema é feito por um Controlador Lógico Programável (PLC) / Sistema Supervisório (PLC SLC500 Rockwell / Supervisório In Touch). As figuras a seguir mostram telas do sistema supervisório contendo importantes informações para o operador, tais como a corrente do motor, o peso real e desejado da panela.



(a)



(b)

Figura 8 – Telas do Sistema Supervisório.

### 4 CONDIÇÃO DE EMERGÊNCIA (BLECAUTE)

Em caso de falta de energia elétrica, durante o processo de basculamento, é necessário interromper a queda do gusa líquido – uma vez que o sistema de despoeiramento pára de operar – e retornar o carro torpedo à posição vertical (0°), cessando a queda do material na panela (que pode estar quase cheia), e pôr o carro torpedo na posição de segurança. O motor DC não é eficaz para esta finalidade, pois sua velocidade é muito pequena.

Nesse caso, há riscos que devem ser considerados e minimizados:

A) Risco ao Processo:

- Risco Humano: há empregados que trabalham na região que podem ser atingidos pela projeção de metal quente.
- Caso o gusa líquido caia no chão ocorrerão danos aos trilhos e ao carro de transferência, além de parar a produção do poço, gerando poluição.
- O carro torpedo não pode ser removido do local caso não esteja na posição vertical (razões de segurança).

B) Risco ambiental

- O sistema de despoeiramento pára de operar e a poeira resultante do processo não pode ser sugada - o carro torpedo não pode bascular.
- Caso seja gerada uma ocorrência ambiental a ArcelorMittal Tubarão deve explicações aos órgãos ambientais e pagamento de multas.

Para encontrar uma solução para estes problemas, foi proposta uma nova topologia para o sistema de acionamento, de forma a garantir a operação segura durante uma ocorrência de falta de energia, usando o motor de indução trifásico, utilizando



inversor de frequência alimentado por tensão contínua obtida de banco da baterias, já em operação. Este sistema foi desenvolvido pelo ArcelorMittal Tubarão em parceria com a Yaskawa elétrico do Brasil.

## 5 SOLUÇÃO PROPOSTA

As premissas estabelecidas para este projeto foram:

- 1) Permitir o retorno rápido do carro torpedo à posição de segurança em caso de falta de energia.
- 2) Padronização do acionamento dos 2 tipos diferentes de carros torpedo.
- 3) Remover inversor de frequência existente dos carros torpedo da Demag, que apresentavam o nível elevado de falha.

Foi definida a utilização de inversores de frequência nos 10 pontos de basculamento existentes. Durante o processo de detalhamento de engenharia, foi definido o inversor Yaskawa: modelo F7U4022 - 22kW (30HP) - 45A com capacidade de sobrecarga de 150% por 1 minuto.<sup>(1)</sup>

### A - SISTEMAS SEM EMERGÊNCIA

Foram instalados em todos os novos sistemas, inversores de frequência (VSD) e conversores de C.C., tal como mostrados na Figura 9.

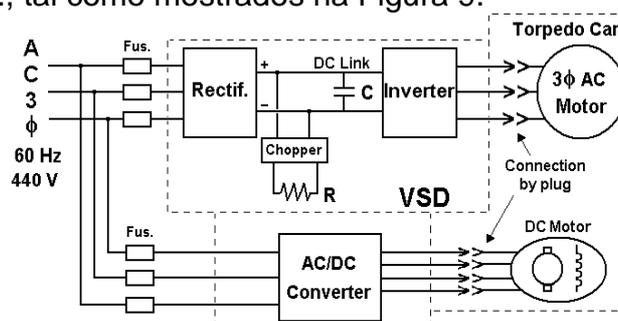


Figura 9 – Diagrama de blocos geral do sistema de acionamento, sem emergência.

Foram definidos dois modos de operação para o sistema:

- ✓ Operação Normal: VSD alimentado em 440 Vac – correspondendo a 100% da velocidade nominal.
- ✓ Motor DC (falha do motor CA): 220 Vdc alimentado por um conversor C.C. - correspondendo a 10% da velocidade nominal.

### B – SISTEMAS COM EMERGÊNCIA

No caso da Aciaria (2 sistemas), onde é necessário um sistema de emergência eficaz, decidiu-se o uso do motor C.A. para operação na condição de emergência (alta velocidade), através de VSD alimentado por tensão contínua de baterias.

Foram definidos 4 modos de operação para o sistema:

- ✓ Operação Normal: Mesma Condição descrita em A.
- ✓ Operação em blecaute: VSD alimentado por 456Vdc (baterias) - correspondendo a 50% da velocidade nominal dos carros Cobrasma e 100% dos carros Demag.
- ✓ Motor DC (falha do motor C.A.): mesma condição descrita em A.
- ✓ Partida direta: disponível somente para "equipe elétrica" e apenas para retorno à posição vertical (0°).

O diagrama de blocos a seguir (Figura 10) mostra a nova topologia deste sistema:

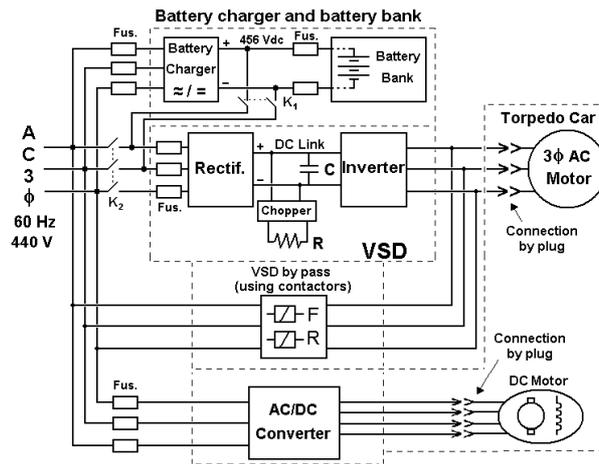


Figura 10. Diagrama de blocos do sistema com alternativa da emergência.

Notas: 1) Os dois inversores (um para cada poço) usam o mesmo carregador e banco de baterias.

2) Os contatores K1 e K2 são intertravados.

O valor mínimo de tensão do link DC do inversor Yaskawa é 380 VDC.<sup>(1)</sup> Abaixo deste valor o sistema desarma por sub-tensão. De acordo com a ArcelorMittal,<sup>(2)</sup> considerou-se 2,00 Vdc para o valor inicial da tensão de descarga e 1,75 Vdc para o valor mínimo de tensão de cada elemento da bateria chumbo-ácida.

Por razões de segurança, foi adotado o valor de 399Vdc como a tensão mínima para o link DC (5% maior do que o valor mínimo para a tensão do link DC Yaskawa).

Foi então especificado um banco da bateria com 228 elementos (35 Ampere-hora). Desta forma:

$$V_{DC\_initial} = 2.00 \cdot 228 = 456V_{DC} \quad (1)$$

$$V_{DC\_min} = 1.75 \cdot 228 = 399V_{DC} \quad (2)$$

O valor máximo para a tensão da ligação em C.C. é:

$$V_{DCLink} = \sqrt{2} \cdot V_{Line} \quad (3)$$

Considerando esta circunstância, é possível calcular a tensão teórica, correspondente à tensão de entrada, para as situações (1) e (2):

$$V_{Line\_initial} = \frac{456}{\sqrt{2}} = 323V_{AC} \quad (4)$$

$$V_{Line\_min} = \frac{399}{\sqrt{2}} = 283V_{AC} \quad (5)$$

Durante a operação normal, a tensão do link DC é próxima de 620V (440 x 1.41). A fim de manter inalterada a relação entre a tensão e a frequência (relação V/Hz), calculou-se o valor máximo da frequência para este modo de operação, como segue:

440 V ----- 60 Hz



323 V ----- x (baterias totalmente carregadas)  
283 V ----- y (mínima tensão do banco de baterias)

Assim:

x = 44 Hz (73 %)

y = 39 Hz (65 %)

Considerou-se a frequência de 30 Hz durante a condição de falta de energia. Esta é a velocidade nominal para os novos carros torpedo (Demag) e representa 50% da velocidade para os carros mais velhos (Cobrasma). Durante testes de performance considerou-se que esta velocidade era satisfatória para colocar o carro torpedo em uma condição segura (em conformidade com as condições de emergência).

O sistema do carro torpedo é um sistema de torque constante. Assim, ao se operar com a 50% da velocidade nominal (carros Cobrasma em modo de emergência), a potência do sistema será reduzido também em 50% (os carros Demag manterão a potência nominal).

A potência no link DC na operação normal ( $V_{Line} = 440 V_{AC}$ ) é [3]-[4]:<sup>(3)</sup>

$$P_{DC} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{Line} \cdot I_{Line} \quad (6)$$

A potência nos bancos de baterias é:

$$P_{battery} = V_{battery} \cdot I_{battery} \quad (7)$$

Durante a operação em condição de emergência, basculando um carro Demag com velocidade e potência nominais - o pior caso, (6) = (7). Desta forma:

$$I_{DC} = \frac{594.2}{V_{battery}} \cdot I_{Line} \quad (8)$$

Portanto:

Para  $V_{battery} = 456 V_{DC}$ ,  $I_{DC}$  corresponde a 1,30  $I_{Line}$ .

Para  $V_{battery} = 399 V_{DC}$ ,  $I_{DC}$  corresponde a 1,49  $I_{Line}$ .

O inversor da Yaskawa foi selecionado, levando-se em consideração a sobre-corrente dos diodos retificadores.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

Desde o comissionamento (dezembro/2003), o sistema opera satisfatoriamente, sem ocorrências de falha. Abaixo são mostrados dois registros oscilográficos da corrente de saída [A], da frequência de saída [Hz] e da tensão do link DC [ $V_{DC}$ ], do carro torpedo Cobrasma # 1, descrevendo a operação do sistema em diferentes condições de operação, usando um registrador oscilográfico da Yokogawa (ORM1200).

A – Registro oscilográfico em condições normais

A Figura 11 descreve uma operação normal de carregamento de gusa na panela. Neste registro, no início de basculamento, o motor opera continuamente, até o gusa cair na panela. Nesta operação, a frequência do inversor era sempre de 60 Hz. Após o início da queda de gusa, o operador continua o processo de basculamento em pequenos movimentos, acionando e desacionando o motor AC diversas vezes, a fim de controlar o fluxo de gusa. Quando o basculamento estiver concluído (panela cheia), o operador retorna o carro torpedo à posição vertical ( $0^\circ$ ).

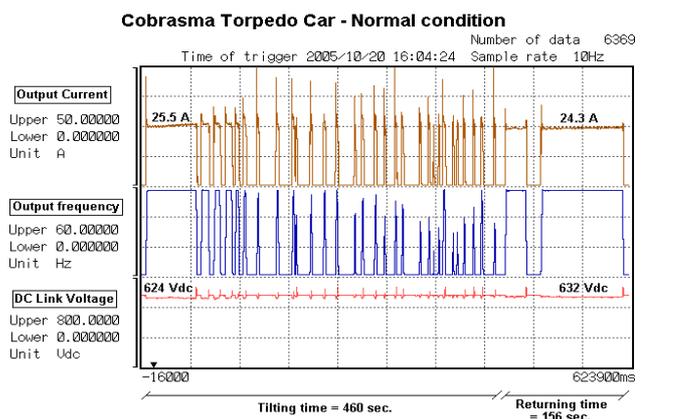


Figura 11 – Registro oscilográfico do carro torpedo Cobrasma durante operação normal.

### B - Registro oscilográfico em condição de emergência

A Figura 12 descreve uma simulação de condição de emergência - retornando o carro do torpedo à posição vertical utilizando o inversor de freqüência alimentado pelo banco da bateria. Para esta simulação, o carregador de bateria foi desligado. Neste registro, durante o basculamento, o motor CA é acionado sem parar com freqüência de 60 Hz, durante 106 segundos. Após isso, foi simulada uma falta de energia (desligando o disjuntor do circuito principal do inversor - 440Vac). A tensão do link DC caiu a zero e então o operador mudou o modo de operação para "operação em blecaute". Assim, o inversor recebeu a tensão DC através dos terminais de entrada ( $L_1$  &  $L_2$ ), correspondente a 462 V<sub>DC</sub> (valor inicial). O processo de retorno à posição vertical se iniciou, durando cerca de 208 segundos para atingir a posição vertical (0°). Durante esta simulação, a freqüência do inversor foi de 60 Hz na condição normal e de 30 Hz na operação "em modo blecaute". Ao fim desta simulação, a tensão do link DC (banco de baterias) era de 447 V<sub>DC</sub>.

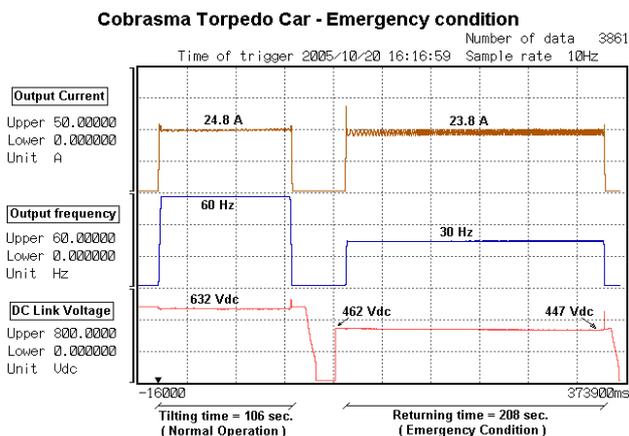


Figura 12 – Registro oscilográfico do carro torpedo Cobrasma durante simulação de condição de emergência

### C – Índice de atendimento da manutenção – antes e após a reforma do sistema.

Antes da reforma do sistema (Dez./2003) – o índice de atendimentos da equipe de manutenção de turno – parte elétrica – era de aproximadamente 2.33 ocorrências/mês.



Após a reforma do sistema, a taxa média de chamadas reduziu significativamente para 0.318 ocorrência/mês. Este valor representa uma redução de manutenção da ordem de 86.4%

Nota: Estes dados foram obtidos através do sistema informatizado de manutenção da ArcelorMittal Tubarão (SISMANA).

## 7 OBJETIVOS ATINGIDOS

Além do principal objetivo alcançado – permitir a operação segura em caso de falta de energia - pode-se listar outros benefícios após o comissionamento deste sistema, tais como:

- eliminação do risco de acidente ambiental;
- aumento da confiabilidade do sistema (três novos modos operacionais);
- aumento do índice de disponibilidade do equipamento (redução do índice da falha do equipamento);
- melhoria do painel elétrico atual;
- redução de componentes dentro dos carros torpedo Demag;
- padronização dos sistemas de acionamento dos carros Demag e Cobrasma;
- redução de custos de manutenção (carros e sistema); e
- possibilidade de ajuste linear de velocidade de basculamento dos carros.

O uso de VSD também reduziu os impactos mecânicos devido à partida direta (sistema anterior do carro torpedo Cobrasma) e reduziu a manutenção em componentes dentro dos carros torpedo (lonas de freios, redutor, pinhão, coroa e corrente).

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho introduziu uma idéia que pode ser usada em muitas outras aplicações industriais, uma vez que há muitos sistemas de acionamento com características similares, podendo ser alvo de um estudo de engenharia mais detalhado.

Este estudo teve como objetivo descrever a aplicação bem sucedida de um VSD em um sistema de emergência, alimentado por banco de baterias, conseguindo desta forma impedir acidentes e dar confiabilidade ao sistema.

Além dos benefícios mencionados anteriormente, esta solução reduziu os custos de manutenção, eliminando paradas de produção, tornando-se uma solução muito bem sucedida nesta planta industrial.

O comissionamento deste sistema tornou possível a eliminação de risco de acidente ambiental, aumentando a confiabilidade do sistema e reduzindo os custos de manutenção.

## REFERÊNCIAS

- 1 Yaskawa F7 Drive User Manual, Software version: 3010 Rev:03-05, May, 5<sup>th</sup>, 2003, pp. Diagnostic & Troubleshooting 6-8, Parameters A-31.
- 2 ArcelorMittal Tubarão Technical Requirements for design and supply of DC Accumulators – PT-ENG-EGEL-00-0011.
- 3 Dewan, S. B.: *Power Semiconductor Drives*, John Wiley & Sons, 1984, pp. 97-101.