

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MOTORES INSTALADOS EM AMBIENTES HOSTIS: MINERAÇÃO E EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO

FREDERICO AUGUSTO LOPES SOUZA¹, HÉLDER DE PAULA²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, ²Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

E-mails: fred.eletrica@yahoo.com.br, helder@cpdee.ufmg.br

Abstract— This paper presents a study addressing motor drive systems that operate in harsh environments, exposed to stress agents which increase the components failure rate and compromise the overall reliability indexes. More specifically, the present work consists in a case study involving two typical applications where such stress factors are present: mining and submarine systems. In both cases, there is the physical-chemical action from agents as dust, humidity, vibration, salinity and others, which degrade the electronic devices integrity and potentialize their failure probability. In this study, the components basic failure rate values are obtained mainly from standards, being lately corrected to account for the effect of the environmental stress, by means of a methodology based on Fuzzy rules, developed by the authors in previous works. A detailed representation of the drive system components is made, in order to ensure more accurate results. For each application (mining and submarine), the analysis is developed for the system in its traditional topology and also for the innovative configuration based on DC transmission, in which the frequency converter is split in its rectifier and inverter units, distant to each other and interconnected by the long cable originally employed for the connection between motor and inverter, being the latter installed right at the motor terminals. The results are presented as reliability figures and discussed.

Keywords — Reliability, environmental stress, Fuzzy rules based system (FRBS), motor drive systems, mining, submarine systems.

Resumo — O presente artigo apresenta um estudo sobre sistemas de acionamento de motores que operam em ambientes adversos, ou seja, expostos a agentes de estresse que elevam a taxa de falhas dos seus componentes e degradam seus índices de confiabilidade. Mais especificamente, o trabalho consiste na elaboração de um estudo de casos envolvendo duas aplicações típicas onde tais fatores de estresse encontram-se presentes: ambientes de mineração e sistemas submarinos, em atividades de extração de petróleo. Em ambos os casos, ocorre a ação físico-química de agentes como poeira, umidade, vibração, salinidade e outros, que comprometem a integridade dos dispositivos eletrônicos e potencializam a sua probabilidade de falha. Neste trabalho, os valores das taxas de falha básicas foram obtidas principalmente de normas, sendo posteriormente corrigidas para contabilizar o efeito de tais fatores de estresse ambientais, por meio de uma metodologia baseada em regras Fuzzy desenvolvida pelos autores em trabalhos anteriores. Uma representação detalhada dos componentes do sistema de acionamento foi elaborada, de forma a assegurar uma melhor exatidão dos resultados obtidos. Em cada aplicação (mineração e submarino), a análise foi conduzida para o sistema de acionamento tanto em sua topologia tradicional como na configuração inovadora baseada em transmissão CC, na qual o conversor de frequência é dividido em suas unidades retificadora e inversora, agora distantes e interligadas pelo cabo longo originalmente utilizado para a conexão do motor ao inversor, ficando este último instalado junto ao motor. Os resultados são apresentados na forma de figuras de mérito relacionadas ao cálculo da confiabilidade e posteriormente discutidos.

Palavras-chave — Confiabilidade, fatores ambientais, sistema baseado em regra fuzzy (SBRF), sistema de acionamento de motores, mineração e extração de petróleo.

1 Introdução

Devido à crescente complexidade dos sistemas de acionamento de motores empregados atualmente, aliada às elevadas exigências de condições operativas, ao alto grau de automação e ao requisito da continuidade de serviço dos conversores, tem-se que o estudo da confiabilidade desses sistemas deve ser conduzido de forma criteriosa. Nesse tocante, este trabalho apresenta uma análise da confiabilidade de sistemas de acionamento em situações nas quais a hostilidade do ambiente pode acelerar a deterioração dos componentes eletrônicos, reduzindo a confiabilidade do sistema. Em (Rocha, 2012) são apresentados dois exemplos de setores industriais que ratificam a importância do estudo da confiabilidade: sistemas de extração de petróleo e mineração. Em tais aplicações, a questão da confiabilidade se mostra especialmente importante, pois, tal como demonstrado em (Castro Júnior, et al., 2012), é conveniente manter o inversor

o mais próximo possível dos motores para se evitar problemas de compatibilidade eletromagnética conduzida; contudo, isso submete o inversor ao mesmo ambiente hostil do motor, implicando em estresse adicional aos seus componentes internos e redução da confiabilidade do equipamento.

No setor de óleo e gás, a exploração em águas profundas é realizada distante da costa e com difícil acesso aos equipamentos empregados; dessa maneira, a continuidade de serviço dos conversores precisa ser garantida, por necessidades do processo e dificuldades de manutenção do mesmo. Já na indústria de mineração, grandes transportadores de correia são utilizados, pois são o meio mais eficiente e econômico para o transporte de minerais e cargas pesadas das minas para outros destinos (Jeftenic, et al., 2010); dessa forma, a parada do conversor por uma falha normalmente implica na parada de todo o sistema de transporte, implicando em enormes prejuízos.

Face ao exposto, a confiabilidade do sistema de acionamento deve ser analisada criteriosamente, avaliando-se inclusive qual é a taxa de falhas esperada do

inversor quando o mesmo encontra-se submetido a um conjunto de fatores de estresse de natureza ambiental, tal como a presença de salinidade, umidade, vibração, temperatura excessiva e outros. Vale ressaltar que tal estudo mostra-se bastante abrangente ao envolver diferentes temas, dentre os quais pode-se citar: determinação de taxas de falhas de componentes eletrônicos, conhecimento do potencial de degradação de fatores ambientais (efeitos da ação dos agentes físico-químicos), configurações empregadas para o conversor de frequência, dentre outros. Em trabalhos anteriores (Souza, et al., 2014; Souza, et al., 2015; Souza, 2015), os autores apresentaram contribuições ao tema em questão (i) ao apresentarem os métodos tradicionais utilizados para quantificar a taxa de falha em situações adversas; (ii) ao discutirem as principais normas utilizadas para a caracterização dos ambientes industriais; (iii) ao proporem um método para aprimorar a análise do estresse ambiental, por meio da utilização da teoria Fuzzy; (iv) contextualizarem o assunto para o cenário das aplicações industriais, apresentando exemplos de sistemas de acionamento de motores elétricos quando aplicado em ambientes hostis – mineração e marítimo. Neste contexto, o presente trabalho agrega novas contribuições ao tópico, ao aprimorar as análises preliminares mais simplificadas realizadas anteriormente, apresentando as seguintes melhorias: (i) a composição dos ambientes foi revista e aprimorada, tornando-se mais fidedigna à realidade; (ii) a metodologia para a definição dos fatores de estresse passou por ajustes, mostrando-se mais eficiente; (iii) a representação do sistema de acionamento como um todo, assim com a do conversor propriamente dito, inclui novos elementos, tornando-se mais detalhada.

2 Confiabilidade de Sistemas de Acionamento de Motores na Presença de Agentes de Estresse

Conforme já mencionado, em trabalhos anteriores foram estudados o impacto na confiabilidade dos dispositivos eletrônicos devido à sua operação em ambientes com vibração, poeira, elevadas temperaturas, dentre outros. Nesse tocante, foram discutidas como as principais normas/manuais para a predição da taxa de falhas dos componentes eletrônicos contemplam os ambientes hostis. Observou-se que, de uma maneira geral, essas não conseguem caracterizar o ambiente de uma forma apropriada, devido a diversos aspectos; cita-se, por exemplo, a subjetividade apresentada pela classificação ambiental, tão usual nas normas de predição. Nesse sentido, foi proposto um método, por meio de um Sistema Baseado em Regras Fuzzy (SBRF), para melhor caracterizar o ambiente e, conseqüentemente, determinar com mais exatidão o fator de estresse ambiental. Entretanto, nos trabalhos já citados na seção anterior, as análises foram aplicadas a um estudo de caso apenas didático, onde a representação do conversor foi bastante simplificada e contemplando ambientes que continham apenas um ou dois fatores de estresse

ambiental. Sob esse aspecto, este trabalho apresenta uma análise bastante criteriosa de um sistema de acionamento de motores operando no âmbito de três ambientes que reproduzem aplicações industriais específicas, quais sejam, ambientes: (i) isento de estresse, (ii) de mineração e (iii) marítimo (extração de petróleo).

2.1 Detalhamento do Sistema de Acionamento Analisado

Devido à infinidade de topologias existentes para as diversas aplicações conhecidas, nesse trabalho optou-se por analisar um conversor VSI (*Voltage Source Inverter*), cujas características são: não-regenerativo, tensão de suprimento de 220 V, capacitores do barramento CC de 400 V, IGBTs e diodos de 600 V; além disso, em sua representação também estão incluídos o dissipador, *cooler*, unidade de controle e sensores de tensão e corrente.

É importante destacar que a metodologia aplicada a esse conversor pode ser utilizada para qualquer outro. Para se determinar a sua confiabilidade, deve-se somar a taxa de falha de todos os seus componentes eletrônicos (corrigidas em função de eventuais agentes ambientais) e assim se obter a taxa de falha total do equipamento; em seguida, pode-se analisar os seus índices de confiabilidade, ou seja, determinar as figuras de mérito de interesse.

Para a análise da sua confiabilidade, o sistema de acionamento foi dividido em quatro subsistemas: (i) motor, (ii) conversor de frequência, (iii) transformador e (iv) circuito de proteção e cabos (disjuntor e cabos). A partir do ponto de vista da confiabilidade, tem-se uma estrutura em série, o que significa que todos os quatro subsistemas devem funcionar para que a unidade realize suas funções.

O conversor é o subsistema essencial dentro da unidade, consistindo de vários componentes eletrônicos que funcionalmente interagem uns com os outros de uma forma complexa. Nesse trabalho, o conversor de frequência foi dividido em três subsistemas (controle, potência e refrigeração), que são considerados dependentes uns dos outros sob os aspectos de confiabilidade, pois a falha de qualquer um dos subsistemas provoca falha no sistema global, já que o sistema de acionamento não poderá funcionar em suas condições nominais.

A primeira etapa para o estudo da confiabilidade é a determinação das taxas de falhas de todos os itens do sistema de acionamento, que neste trabalho foram obtidas da seguinte maneira:

- Componentes não eletrônicos (proteção, cabos, transformador e motor): após uma ampla investigação de diferentes obras sobre suas taxas de falha, as informações necessárias foram obtidas em (Wikström, et al., 2000; Klug & Mertens, 2003; Molaei, et al., 2006; Riedel, et al., 2012).
- Componentes eletrônicos: as informações necessárias foram obtidas por meio das normas de predição das taxas de falhas (Department of Defense USA, 1995; Telcordia Technologies,

2001; IEC, 2004; FIDES Group, 2009), juntamente a valores encontrados em outras fontes (Wikström, et al., 2000; Klug & Mertens, 2003; Julian & Oriti, 2007; Riedel, et al., 2012; Valipour, et al., 2015).

A escolha por tais fontes considerou a validade dos dados, adequação dos fatores ambientais, manutenção de dados, reconhecimento internacional, usabilidade e adequação de novas tecnologias.

A Tabela 1 mostra as taxas de falhas e o MTBF utilizados para se estimar a confiabilidade do sistema de acionamento, para o caso em que todos os itens estão dentro de suas especificações elétricas e ambientais, ou seja, onde não existe estresse ambiental.

Existem na literatura diferentes formulações para se estimar a confiabilidade de equipamentos eletrônicos, cujos valores de taxas de falhas podem apresentar discrepâncias significativas. Isso se deve a vários aspectos, tais como: aplicação do componente, níveis de tensões e corrente, materiais utilizados nos componentes, qualidade empregada pelo fabricante, tecnologia utilizada, dentre outros. Nesse aspecto, é importante analisar as características construtivas e operacionais dos itens em estudo e o método empregado para se determinar a taxa de falha. É importante destacar que mesmo se fossem utilizadas outros valores de taxas de falha nesse trabalho, isso não iria interferir no método para se estimar os índices de confiabilidade do sistema; apenas seriam encontrados outros valores numéricos como resultado.

Tabela 1. Taxas de falha básicas utilizadas para se estimar a confiabilidade do sistema (sem estresse ambiental).

Componente/Item	Taxa de falha [10 ⁻⁹ horas]	MTBF [anos]	Fonte ¹	Item do sistema ²
Componentes não eletrônicos				
Disjuntor	640	178	(Klug & Mertens, 2003; Molaei, et al., 2006)	PC
Transformador	1600	71	(Klug & Mertens, 2003; Molaei, et al., 2006)	T
Motor (Indução)	3200	36	(Wikström, et al., 2000; Klug & Mertens, 2003; Molaei, et al., 2006)	M
Cabos	200	571	(Riedel, et al., 2012)	PC
Componentes eletrônicos – Conversor				
Capacitor, 400 V	50	2283	Normas/manuais ³	P
IGBT, 600 V, 100 A	52	2195	Normas/manuais ³	P
Diodo de roda livre	23	4963	Normas/manuais ³	P
Diodo, 100V, 100A	50	2283	Normas/manuais ³	P
Amp. Op	60	1903	(Julian & Oriti, 2007; Valipour, et al., 2015)	C
Capacitor, 30 V	320	357	(Julian & Oriti, 2007; Valipour, et al., 2015)	C
Conector	200	571	(Wikström, et al., 2000; Riedel, et al., 2012)	C
Indutor	360	317	(Julian & Oriti, 2007)	C
Sensor efeito hall	70	1631	(Julian & Oriti, 2007)	C
Resistor	180	634	(Julian & Oriti, 2007)	C
DSP	2400	48	(Julian & Oriti, 2007)	C
Conversor A/D	100	1142	(Julian & Oriti, 2007; Valipour, et al., 2015)	C
Microcontrolador	470	243	(Julian & Oriti, 2007)	C
Cooler	800	143	(Telcordia Technologies, 2001; Klug & Mertens, 2003)	R

¹ Fonte: A coluna fonte indica a referência bibliográfica da qual a taxa de falha foi extraída.

² Item do sistema: M (motor), T (transformador) e CP (circuito de proteção e cabos). Subsistemas do conversor: C (controle), P (potência) e R (refrigeração).

³ Os valores obtidos por meio das normas/manuais de predição (Department of Defense USA, 1995; Telcordia Technologies, 2001; IEC, 2004; FIDES Group, 2009) são aproximadamente iguais quando se considera o componente eletrônico sem estresse (taxa de falha básica ou de referência); por esse motivo, foi considerado um valor ponderado entre os valores obtidos por meio dessas normas/manuais.

2.2 Metodologia utilizada – SBRF

Em trabalhos anteriores (Souza, 2015; Souza, et al., 2015), foi proposta pelos autores do presente artigo uma metodologia, baseada em SBRF, para a determinação da taxa de falhas de dispositivos eletrônicos operando em ambientes hostis, capaz de produzir resultados mais realistas que aqueles provenientes de normas/manuais de predição de taxas de falhas. Por meio da elaboração da base de regras *Fuzzy* e do conhecimento da influência dos fatores ambientais sobre os itens, pode-se efetuar as devidas correções nas taxas de falha originais de uma forma mais exata e menos subjetiva. Como tal metodologia apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à determinação do estresse ambiental, esse foi o método empregado neste trabalho. Em sua aplicação, foram considerados dez agentes ambientais, a saber: Temperatura Alta (TA), Temperatura Baixa (TB), Umidade Relativa (UR), Variação de Temperatura (VT), Vibração - Amplitude (VA), Areia (AR), Pressão (PR), Choque Mecânico - aceleração (CM), Agente Químico – Salinidade (Cl, NO, etc. - AQ) e Poeira (PO). Tais agentes serão devidamente associados para a composição dos ambientes que serão analisados (mineração e marítimo).

2.3 Ambientes sob Estudo

Dentre as normas estudadas para a caracterização do ambiente (IEC, 1995; IEC, 2002; ETS, 2002), foi utilizada a IEC 60721-3 para definir a combinação dos agentes ambientais para a composição dos três ambientes (sem estresse, mineração e marítimo). Ou seja, foram atribuídos os níveis de cada agente ambiental segundo essa norma, caracterizando cada um dos ambientes sob estudo da maneira mais próxima possível ao que se deve encontrado em campo. São eles:

- Ambiente sem estresse ambiental - Classificação IE 31 (IEC, 2002): Local com temperatura e umidade controladas, mínima presença de areia e poeira; vibração e choque mecânico são desprezados.
- Ambiente típico de mineração - Classificação IE 42 (IEC, 1995): Local com temperatura elevada, exposto a areia ou poeira em alta proporção, vibração e choques mecânicos significativos, níveis normais de agentes químicos e presença de respingos de água.
- Ambiente marítimo - Classificação IE 34 (IEC, 2002): Local com baixa temperatura, alta umidade, exposto a salinidade, areia em proporção moderada, vibração e choques mecânicos moderados.

Os três ambientes definidos acima serão combinados de forma a representar as duas aplicações em estudo. No ambiente de um sistema de mineração, por exemplo, o transformador e o conversor de frequência localizam-se em um ambiente protegido, sem estresse ambiental, como o de um Centro de Controle de Motores (CCM), por exemplo, enquanto o (longo) cabo de interligação e o motor ficam submetidos a temperatura elevada, poeira, vibração, etc. Ou seja, os componentes associados ao transformador e ao conversor completo (dispositivos das pontes retificadora e inversora, unidade de controle, *cooler*, etc)

terão sua confiabilidade calculada com base nos valores das taxas de falha básicas, ou seja, sem a correção referente aos fatores de estresse ambiental. Já a confiabilidade do cabo e do motor serão obtidas a partir das taxas de falha corrigidas, visto que os mesmos situam-se no ambiente definido como propriamente de mineração, onde todos os agentes citados na classificação feita anteriormente estão presentes. Todavia, isso vale para esse sistema em sua configuração tradicional; no caso da topologia empregando transmissão CC (Castro Júnior, et al., 2012), alguns dos componentes que originalmente situavam-se no ambiente sem estresse, encontram-se agora instalados juntos ao motor, sujeitos às mesmas condições ambientais deste. Em outras palavras, como nessa configuração alternativa a ponte inversora foi instalada junto aos terminais do motor, os IGBTs, diodos de roda livre, capacitores do barramento CC e um segundo cooler, além do cabo e do motor, estão todos sujeitos ao ambiente com estresse, ou seja, sua taxa de falhas deve ser corrigida para os agentes definidos na categoria de mineração supracitada. Já os diodos da ponte retificadora, os itens internos à unidade de controle e o transformador permanecem no ambiente sem estresse e, portanto, representados, na determinação da confiabilidade, pelas suas taxas de falha básicas. O mesmo raciocínio se aplica ao ambiente para extração de petróleo (marítimo). A Tabela 2 apresenta os níveis utilizados para cada agente ambiental nas três situações supracitadas e o respectivo fator de estresse ambiental resultante.

Tabela 2. Fator de estresse devido aos ambientes adversos.

Fator Ambiental	Ambientes		
	A	B	C
TB	15° C	-5° C	-65° C
TA	30° C	55° C	45° C
VT	0,1°	0,5°	0,5°
PR	101 kPa	106 kPa	101 kPa
UR	70 %	90 %	95 %
VA	0,3 mm	3,0 mm	1,5 mm
CM	1 m/s ²	10 m/s ²	5 m/s ²
AR	0 mg/m ³	500	400
PO	0,01	4 mg/m ³	1,5
AQ	0 mg/m ³	0 mg/m ³	60 mg/m ³
Fator de Estresse	1	4,7433	3,5900

3 Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Mineração e Extração de Petróleo

É importante destacar que em aplicações industriais convencionais, o conversor de frequência se encontra em gabinetes apropriados, construídos em locais cujos fatores ambientais adversos são controlados. Todavia, há situações em que a blindagem dos componentes eletrônicos não é total, ficando os itens expostos a alguma interferência do ambiente. No presente trabalho, o sistema de acionamento é estudado em duas aplicações industriais: mineração e extração de petróleo (submarino), que naturalmente envolvem ambientes hostis. Para fins de comparação, em ambos os casos são considerados tanto a configuração convencional como aquela que emprega a transmissão em corrente contínua. As taxas de falha e o MTBF presumidos para os sistemas em foco são mostradas na Tabela 3, consi-

derando que cada componente/item do sistema é submetido ao ambiente no qual o mesmo está inserido, de modo que cada item do sistema de acionamento é estressado de modo particular, respeitando os três ambientes propostos na Tabela 2.

Uma vez determinadas as taxas de falha dos diversos componentes do sistema, é possível então se estimar a função de confiabilidade do sistema (Julian & Oriti, 2007), conforme apresentado nas Figuras 1 a 3. Por meio das Figuras 1 e 2 e da Tabela 3, observa-se que os itens mais confiáveis do sistema são o transformador, o sistema de proteção e os cabos, enquanto o conversor e o motor são os principais responsáveis pelas falhas do sistema, pois possuem as maiores taxas de falha dentre todos os dispositivos. Dessa forma, a confiabilidade desses itens reduz de forma mais abrupta durante o tempo de operação do sistema, principalmente quando o conversor é empregado na configuração que utiliza a transmissão CC. Por exemplo, no caso do sistema de mineração, observa-se um aumento de 27,52% na taxa de falhas ao se comparar o sistema tradicional com aquele por transmissão CC, sendo este aumento de 23,28% no caso do ambiente de extração de petróleo.

Tabela 3. Taxa de falha e MTBF do Sistema de Acionamento.

		Componente/Item	Ambiente ¹	Taxa de falha ²	MTBF ³
Aplicação/Configuração	Mineração	VSI	A	1450,00	78,73
		Refrigeração	A	1000,00	114,16
		Controle	A	5610,00	20,35
		Sensores e gate	A	4050,00	28,19
		Conversor completo	A	12110,00	9,43
		Motor	B	15178,56	7,52
		Transformador	A	1600,00	71,35
		Proteção e Cabos	B	3984,37	28,65
		Sistema Completo	A e B	32872,93	3,47
		Ponte Retificadora (PR)	A	300,00	380,52
		Ponte Inversora (PI)	B	5454,80	20,93
		Refrigeração da PR	A	1000,00	114,16
	Extração de Petróleo	Refrigeração da PI	B	4743,30	24,07
		Controle	A	5610,00	20,35
		Sensores e gate	A	4050,00	28,19
		Conversor completo	A e B	21158,10	5,40
		Motor	B	15178,56	7,52
		Transformador	A	1600,00	71,35
		Proteção e Cabos	B	3984,37	28,65
		Sistema Completo	A e B	41921,03	2,72
		VSI	A	1450,00	78,73
		Refrigeração	A	1000,00	114,16
		Controle	A	5610,00	20,35
		Sensores e gate	A	4050,00	28,19
		Conversor completo	A	12110,00	9,43
		Motor	C	11488,00	9,94
		Transformador	A	1600,00	71,35
		Proteção e Cabos	C	3015,60	37,85
		Sistema Completo	A e C	28213,60	4,05
		Ponte Retificadora (PR)	A	300,00	380,52
		Ponte Inversora (PI)	C	4128,50	27,65
		Refrigeração da PR	A	1000,00	114,16
		Refrigeração da PI	C	3590,00	31,80
		Controle	A	5610,00	20,35
		Sensores e gate	A	4050,00	28,19
		Conversor completo	A e C	18678,50	6,11
		Motor	C	11488,00	9,94
		Transformador	A	1600,00	71,35
		Proteção e Cabos	C	3015,60	37,85
		Sistema Completo	A e C	34782,10	3,28

¹ Ambientes definidos na Seção 2.3.

² Taxa de falha medida em 10⁻⁹ horas.

³ MTBF medido em anos.

A Tabela 3 mostra a contribuição de cada item na confiabilidade do conversor de frequência. Dentre os seus componentes internos, aquele que apresenta a

maior taxa de falhas   banco de capacitores eletrolíticos (entre 700 e 3.320 falhas/10⁹ horas, dependendo da configuração empregada e/ou estresse ambiental submetido) tornando-se, assim, um dos principais elementos responsáveis pela queda da confiabilidade do sistema. Outros dois itens que também possuem elevadas taxas de falhas são o *cooler* e o DSP, com valores de 3.795 e 2400 falhas/10⁹ horas, respectivamente (considerando o pior caso do *cooler* – mineração em transmissão CC). Esses três componentes são cruciais n  são nos índices de confiabilidade do conversor de frequências, como também de todo o sistema de acionamento de motores, visto que o fracasso de um deles leva todo o sistema a falhar.

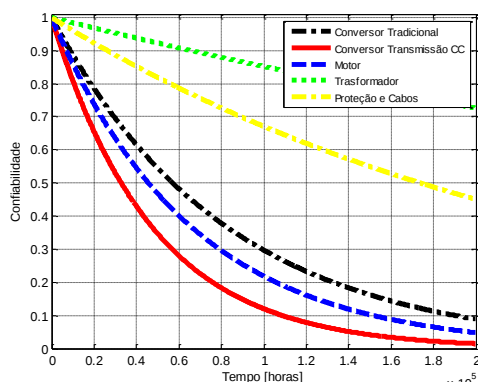


Figura 1. Confiabilidade dos Itens do Sistema de Acionamento – Mineração.

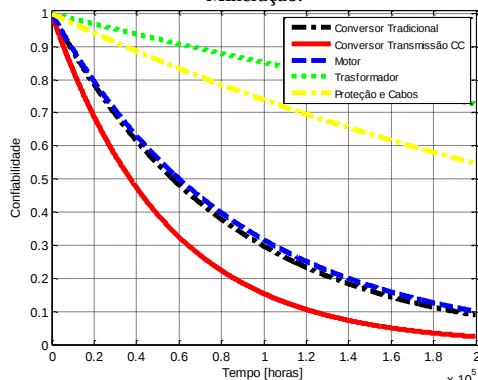


Figura 2. Confiabilidade dos Itens do Sistema de Acionamento – Marítimo.

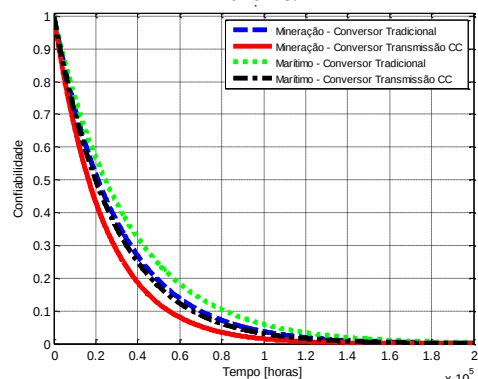


Figura 3. Comparativo da Confiabilidade dos Sistemas de Acionamento – Mineração e Marítimo.

A Tabela 4 apresenta as seguintes figuras de mérito: tempo médio até a falha (MTTF), percentual esperado de falhas nos dois primeiros anos de uso (considerando uma jornada de trabalho de vinte horas diárias) e tempo no qual 10% e 50% dos mecanismos estarão

fora de operação (percentil 10% e tempo mediano, respectivamente), para todos os sistema de acionamento estudados.

Por meio das figuras de mérito apresentadas na Tabela 4, verifica-se o quanto o ambiente pode interferir na confiabilidade do sistema de acionamento. Duas figuras de mérito ratificam essa afirmação: tempo mediano e percentual de falhas nos dois primeiros anos. Estima-se que, nesse período, as falhas aumentem de 33,76 e 38,12% (marítimo e mineração, respectivamente) para valores na ordem de 40 e 45%, respectivamente, quando o sistema é configurado para a transmissão CC (no qual uma maior parte dos seus componentes ficam submetidos ao ambiente adverso, como já explicado), o que representa um aumento significativo. Além disso, de acordo com a informação do tempo mediano, espera-se que metade dos sistemas de acionamento em operação já tenham apresentado falhas em 19.928 horas (extração de petróleo) e 16.535 horas (mineração), para o caso onde a ponte inversora se encontra próxima ao motor (transmissão CC). Tais tempos esperados de funcionamento são sensivelmente inferiores àqueles correspondentes   aplicação do conversor num ambiente isento de estresse ambiental (configuração tradicional), que são de 24.568 e 21.086 horas para as aplicações marítima e de mineração, respectivamente.

Tabela 4. Figuras de mérito - Sistema de Acionamento do Motor.

		Figura de Mérito	Mineração		Extração de Petróleo	
			Tradiciona-l	Trans-missão CC	Tradici-onal	Trans-missão CC
Itens do Sistema de Acionamento	Conver-sor	MTTF ¹	82576	47263	82576	53537
		Falhas ²	16,21%	26,58%	16,21%	23,87%
		P.10% ¹	8700	4980	8700	5641
		TM ¹	57238	32760	57238	37109
	Motor	MTTF ¹	65882	65882	87047	87047
		Falhas ²	19,88%	19,88%	15,44%	15,44%
		P.10% ¹	6941	6941	9171	9171
		TM ¹	45666	45666	60337	60337
	Trans-forma-dor	MTTF ¹	625000	625000	625000	625000
		Falhas ²	2,31%	2,31%	2,31%	2,31%
		P.10% ¹	65850	65850	65850	65850
		TM ¹	433217	433217	433217	433217
	Prote-ção e Cabos	MTTF ¹	250981	250981	331609	331609
		Falhas ²	5,65%	5,65%	4,31%	4,31%
		P.10% ¹	26443	26443	34938	34938
		TM ¹	173967	173967	229854	229854
	Sistema Comple-to	MTTF ¹	30420	23854	35444	28750
		Falhas ²	38,12%	45,78%	33,76%	39,82%
		P.10% ¹	3205	2513	3734	3029
		TM ¹	21086	16535	24568	19928

¹MTTF, Percentil 10% (P. 10%) e Tempo Mediano (TM) medidos em horas.

²Falhas esperadas nos primeiros dois anos, considerando uma jornada de trabalho de vinte horas diárias.

Como assumiu-se que o sistema de acionamento em análise é um sistema em série do ponto de vista da confiabilidade, tem-se que o fracasso de qualquer um dos seus itens provoca a parada de todo o processo de acionamento do motor; logo, os índices das figuras de mérito do sistema completo são piores se comparados com aos dos seus subsistemas. Por exemplo, ao se analisar a falha esperada do acionamento nos dois primeiros anos para o caso da mineração utilizando a configuração com transmissão CC (pior caso), o resultado obtido para o sistema completo foi igual a 45,78%, que é consideravelmente

superior ao de qualquer um dos seus subsistemas: conversor (26,58%), motor (19,88%), transformador (2,31%) e proteção e cabos (5,65%). Naturalmente, um resultado análogo é observado para os demais casos, tal como mostra a Tabela 4.

Ao se confrontar os ambientes de mineração e extração de petróleo, observou-se que o que apresentou maior taxa de falhas foi o sistema de mineração (Figura 3). Vale esclarecer, contudo, que o outro ambiente, na prática, pode apresentar índices superiores caso os valores dos agentes físico-químicos forem maiores que aqueles utilizados nesse trabalho. De qualquer forma, pode-se concluir que houve um aumento expressivo da taxa de falhas quando o inversor foi exposto ao ambiente agressivo, o que demonstra que ambientes contendo fatores de estresse impactam negativamente a confiabilidade do sistema de acionamento de motores, de uma forma expressiva. Ou seja, os resultados apresentados demonstram, de uma forma inequívoca, que a análise do meio no qual o conversor (assim como outros dispositivos) está inserido não pode ser desprezada na determinação da confiabilidade do sistema.

4 Conclusão

Neste trabalho, analisou-se a confiabilidade de um sistema de acionamento em duas aplicações distintas (mineração e extração de petróleo), nas quais agentes ambientais com potencial de degradação encontram-se presentes. Além disso, o estudo foi conduzido para duas situações: o sistema de acionamento em sua forma tradicional e também em uma configuração alternativa, baseada em transmissão CC, proposta anteriormente pelos autores. Observou-se que: i) o conversor e o motor são os elementos que possuem a maior taxa de falhas e, por este motivo, são os elementos que mais impactam a confiabilidade do sistema; ii) dentre os diversos componentes existentes no conversor de frequência, o capacitor, *cooler* e DSP são os mais críticos nos índices de confiabilidade; iii) diversos fatores ambientais podem ser modelados e analisados simultaneamente utilizando-se a metodologia baseada em SBRF, que mostrou-se bastante efetiva para esse propósito. Vale destacar que, embora normalmente o conversor se encontre protegido dos agentes ambientais pelo seu painel/gabinete/invólucro, tem-se que muitas vezes a blindagem dos componentes eletrônicos é apenas parcial.

No que diz respeito à configuração do sistema com transmissão CC, na qual a ponte inversora encontra-se junto ao motor, foi observada uma queda substancial dos níveis de confiabilidade. Em contrapartida, tem-se que essa aplicação apresenta diversas vantagens, tais como a eliminação das sobretensões transitórias nos terminais do motor, redução da corrente de carga do cabo, diminuição da circulação de correntes de modo comum no sistema, menor queda na tensão disponibilizada ao motor e substancial economia de cobre. Assim, parte dos benefícios fi-

nanceiros provenientes disso (eliminação do filtro de saída do inversor, economia de energia devido às menores perdas na transmissão, menor custo de aquisição dos cabos, etc) pode ser empregada para se incrementar os níveis de confiabilidade do sistema, como utilizar redundâncias na unidade inversora do conversor, por exemplo.

Com relação à metodologia utilizada, é importante destacar que a mesma só é aplicada dentro das faixas de valores previstas nas normas ambientais e, como não houve validação experimental, podem existir diferenças com relação aos resultados em campo. Todavia, uma vez conhecida tal discrepância, pode-se modificar a composição da base de regras *Fuzzy* considerando essa nova informação, tornando o método mais exato.

Referências Bibliográficas

- Castro Júnior, J. A., Paula, H. d., Cardoso Filho, B. d. J. & Rocha, A. V., 2012. Rectifier-to-Inverter Connection Through Long DC Cable - Part II: The Complete Copper Economy Characterization. *IEEE Tran. on Ind. App.* January/February, 48(1), pp. 229-235.
- Department of Defense USA, 1995. MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment. s.l.:s.n.
- ETS, 2002. ETS 300 019-1: Class. of env. conditions. s.l.:s.n.
- FIDES Group, 2009. FIDES Guide 2009 Issue A: Reliability Methodology for Electronic Systems. s.l.:s.n.
- IEC, 1995. IEC 60721-3-4: Classification of environmental conditions - Part 3-4: Classification of groups of environmental parameters and their severities - Stationary use at non-weatherprotected.
- IEC, 2002. IEC 60721-3-3: Class. of environmental conditions - Part 3-3: Class. of groups of environmental parameters and their severities - Stationary use at weatherprotected locations. s.l.:s.n.
- IEC, 2004. IEC TR 62380: Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment. s.l.:s.n.
- Jeftenic, B. et al., 2010. Optimal utilization of the bulk material transportation system based on speed controlled drives. s.n., pp. 1-6.
- Julian, A. L. & Oriti, G., 2007. A Comparison of Redundant Inverter Topologies to Improve Voltage Source Inverter Reliability. *IEEE Tran. on Industry Applications*, Sep./Oct., 43(5), pp. 1371-1378.
- Klug, R.-D. & Mertens, A., 2003. Reliability of megawatt drive concepts. In *Proc. IEE Int. Conf. on Ind. Techn.*, December.
- Molaei, M., Oraee, H. & Fotuhi-Firuzabad, M., 2006. Markov Model of Drive-Motor Systems for Reliability Calculation. *IEEE ISIE* 2006, 9-12 July, pp. 2286-2291.
- Riedel, G. J., Huesgen, T. & Schmidt, R., 2012. Reliability Prediction Sensitivity Analysis - How to Perform Reliability Prediction Time Efficiently. 6th IET International Conference on Machines and Drives - PEMD 2012, p. 6 pages.
- Rocha, A. et al., 2012. Increasing long-belt-conveyor availability by using fault-resilient medium-voltage ac drives. *IEEE Tran. on Ind. App.*, 48(5), p. 1708-1716.
- Souza, F. A. L., 2015. Avaliação, por meio da Metodologia Fuzzy, da Confiabilidade de Sistemas de Acionamento Submetidos a Fatores de Estresse Ambientais. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Souza, F. A. L.; Paula, H. ; Rocha, A. V. . Influence of Environmental Aspects upon the Reliability of Motor Drive Systems: Evaluation Based on Fuzzy Rules. In: 50th IEEE IAS, 2015.
- Souza, F. A. L.; Paula, H. ; Pereira, P. C. T. ; Rocha, A. V. ; Cardoso Filho, B. J. . Motor Drive Systems Reliability: Impact of the Environment Conditions on the Electronic Component Failure Rates. In: IEEE IAS, 2014.
- Telcordia Technologies, 2001. Telcordia SR-332 Insule 1: Reliability Prediction Procedure. s.l.:s.n.
- Valipour, H., Fotuhi Firouzabad, M., Rezazadeh, G. & Zolghadri, M. R., 2015. Reliability Comparison of two Industrial AC/DC Converters with Resonant and non-Resonant Topologies. *PEDSTC2015*, 3-4 Feb., pp. 430-435.
- Wikström, P., Terens, L. A. & Kobi, H., 2000. Rel., Availability, and Maintainability of High-Power Variable-Speed Drive Sys.. s.l.:s.n.