



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

SIMULAÇÃO COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IDENTIFICAR A INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM TREM MAGLEV

Leticia Gomes, gomes.leticia1@aluno.ifsp.edu.br¹

Gabriel de Moraes Cordeiro, cordeiro.gabriel@aluno.ifsp.edu.br¹

Fábio Roberto Chavarette, fabio.chavarette@unesp.br²

¹IFSP, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Acesso Heitor de Souza Pinheiro S/N, Araraquara/SP

²Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Rua Prof. Francisco Degni S/N, Araraquara, SP, 14800-060 ~3,6 km

Resumo: Em todo o mundo existem muitos protótipos de transporte de levitação magnética, e ele têm demonstrado que este modo de transporte pode sim competir lucrativamente com o transporte aéreo. Na Alemanha tem-se o "Transrapid" que é inerentemente instável. Essa instabilidade se deve ao sistema de suspensão eletromagnética, que usa força atrativa para levantar o trem. Logo, dentro das características do monitoramento da integridade estrutural (SHM), uma das principais partes é o processamento dos parâmetros captados e, por conseguinte, o diagnóstico. Contudo, para esse processamento ser eficiente e confiável é exigido um reconhecimento de padrões que consiga abranger a gama de dados oriundo do monitoramento. Um caminho alternativo que dentro da literatura científica, que se apresentou mais eficiente foi à implementação de um Sistema Imunológico Artificial (SIA), oriundo da Computação Inteligente. Ele representa uma classe de algoritmos que buscam representar mecanismos do Sistema Imunológico Biológico. Por meio das características de dinâmica estrutural, o Algoritmo de Seleção Negativa (ANS) e o Filtro de Wiener foram escolhidos para sintetizar o reconhecimento de padrões e a tomada de decisão, fechando a implementação do processo de detecção de falhas com o objetivo de analisar o funcionamento, precisão e eficiência do algoritmo em relação aos sinais que foram propostos, e assim poder visualizar o resultado final de cada processamento e tirar a conclusão de qual das transformadas seriam mais eficientes e que apontasse para uma assertividade ou não.

Palavras-chave: Algoritmo de Seleção Negativa, MAGLEV, Sistema Imunológico Artificial, SHM, Filtro de Wiener.

Abstract. Throughout the world, there are many prototypes of magnetic levitation transportation, and they have shown that this mode of transport can indeed compete profitably with air transportation. In Germany, there is the "Transrapid," which is inherently unstable. This instability is due to the electromagnetic suspension system, which uses attractive force to levitate the train. Therefore, within the characteristics of Structural Health Monitoring (SHM), one of the main components is the processing of captured parameters and, consequently, diagnosis. However, for this processing to be efficient and reliable, pattern recognition is required to encompass the range of data from monitoring. An alternative approach within the scientific literature that has proven more efficient is the implementation of an Artificial Immune System (AIS), stemming from Intelligent Computing. It represents a class of algorithms that seek to mimic mechanisms of the Biological Immune System. Through the characteristics of structural dynamics, the Negative Selection Algorithm (NSA) and the Wiener Filter were chosen to synthesize pattern recognition and decision-making, completing the implementation of the fault detection process with the aim of analyzing the operation, accuracy, and efficiency of the algorithm concerning the proposed signals, and thus being able to visualize the final result of each processing and draw conclusions about which of the transformations would be most efficient and indicative of accuracy or not.

Keywords: Negative Selection Algorithm, MAGLEV, Artificial Immune System, SHM, Wiener Filter.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de trens com levitação magnética, conhecida como MAGLEV (Transporte de Levitação Magnética), desperta grande interesse entre os pesquisadores devido aos seus potenciais benefícios ambientais e de mobilidade. Esses sistemas representam uma alternativa significativa aos meios de transporte convencionais de massa, oferecendo rapidez, conforto e segurança, enquanto também contribuem para reduzir o congestionamento do tráfego e as emissões de poluentes (ZHAO, F.; THORNTON, R.).

Em termos técnicos, os trens MAGLEV apresentam várias vantagens sobre os trens convencionais de rodas sobre trilhos. Segundo Lee, Kim e Lee (LEE, H.-W.; KIM, K.-C.; LEE, J.), algumas dessas vantagens incluem a eliminação de rodas, o que reduz drasticamente o ruído, as vibrações e o desgaste da via, resultando em menores custos de manutenção. Além disso, a distribuição do peso da carga reduz os custos de construção das vias, enquanto a construção dos trens MAGLEV os torna imunes ao descarrilhamento e menos suscetíveis às condições meteorológicas. Esses sistemas também

são capazes de vencer inclinações maiores e raios menores, acelerando e desacelerando rapidamente, sem a necessidade de peças como engrenagens e acoplamentos. Em resumo, os trens MAGLEV representam uma abordagem tecnologicamente avançada e ambientalmente favorável para o transporte de massa (LEE, H.-W.; KIM, K.-C.; LEE, J.).

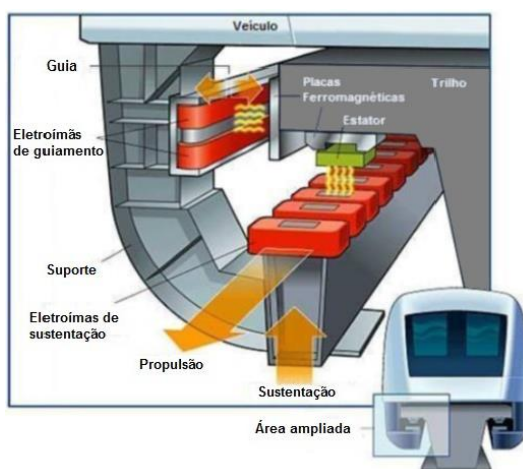


FIGURA 1. Representação dos trilhos do Trem MAGLEV

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que esta pesquisa fosse desenvolvida de forma efetiva foi necessário fazer uma revisão bibliográfica a respeito de todos os assuntos que norteiam o assunto, temas que vão desde o sistema imunológico biológico até funções que nos auxiliem a analisar os sinais ao longo do tempo.

2.1. Sistema Imunológico Biológico

O monitoramento da integridade de estruturas, conhecido como Structural Health Monitoring (SHM) em inglês, tem como objetivo detectar danos em estágios iniciais, intervir na propagação e prevenir a ocorrência de paradas ou danos às estruturas. Danos podem levar a falhas, definidas como alterações no sistema que impedem seu funcionamento satisfatório e sua capacidade de desempenhar funções (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

Assim como as estruturas, o corpo humano é composto por diversos sistemas que, em harmonia, mantêm o organismo funcionando. Um dos sistemas mais importantes é o sistema imunológico, que desempenha um papel crucial na defesa do organismo contra agentes infecciosos. Sem um mecanismo de defesa eficaz, os animais estariam vulneráveis a uma variedade de agentes infecciosos, resultando no colapso dos demais sistemas do corpo. O sistema imunológico atua como uma barreira e um combatente que impede a colonização de microrganismos no meio intracelular. Essa defesa é realizada por meio de uma resposta imune que envolve sistemas, órgãos, tecidos e células, tanto na defesa passiva extracelular quanto na defesa ativa no espaço intracelular contra os agentes infecciosos (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

Existem algumas características particulares do sistema imunológico que despertam o interesse de biólogos e engenheiros (LEHNINGER, T. M., NELSON, D. L. & COX, M. M. ; NELSON, D. L.; COX, M. M.):

- Unicidade: Cada indivíduo possui um sistema imunológico único.
- Detecção distribuída: Os detectores utilizados pelo sistema imunológico são pequenos, eficientes e altamente distribuídos, não estando sujeitos a um controle centralizado.
- Detecção imperfeita: Não é necessário detectar completamente todos os agentes patogênicos; o sistema imunológico é flexível, permitindo um compromisso entre os recursos utilizados na proteção e a abrangência da cobertura.
- Detecção de anomalias: O sistema imunológico pode detectar e reagir a agentes patogênicos aos quais não foi previamente exposto.
- Aprendizado e memória: O sistema imunológico é capaz de aprender as estruturas dos agentes patogênicos e lembrar-se delas para agilizar futuras respostas.

2.3. Monitoramento da Integridade Estrutural

O monitoramento da integridade estrutural, conhecido como Structural Health Monitoring (SHM) em inglês, é um método utilizado para implementar estratégias na identificação de falhas estruturais, abrangendo áreas como Engenharia Mecânica, Civil e Aeroespacial. Esse método pode ser considerado uma forma de manutenção preditiva, uma vez que tem como objetivo realizar diagnósticos do estado da estrutura e prognosticar sua vida remanescente (FARRAR, C. R.; WORDEN, K.).

O processo de monitoramento envolve a gravação contínua, periódica ou periódica contínua de dados que refletem o desempenho estrutural, levando em consideração fatores ambientais, constituição material, esforços esperados e fenômenos de degradação que afetam a estrutura. Para isso, são monitorados parâmetros mecânicos, físicos e/ou químicos.

Por meio da supervisão dos parâmetros analisados, é possível estabelecer relações entre dados sem defeito e dados com defeito, utilizando métodos estatísticos para definir a situação da estrutura ao longo do tempo (FARRAR, C. R.; WORDEN, K.). Dessa forma, o monitoramento envolve a medição da magnitude do parâmetro monitorado e o registro do tempo e do valor da medição.

Esse monitoramento pode ser realizado em nível material ou estrutural, de forma não destrutiva, em diferentes prazos: curto, médio ou longo prazo, ou durante toda a vida útil da estrutura. Esse aspecto é considerado uma inovação significativa decorrente do avanço tecnológico (FARRAR, C. R.; WORDEN, K.).

Os princípios fundamentais do sistema de SHM incluem:

- A presença de falhas e defeitos em todos os tipos de materiais;
- A necessidade de comparar dois estados estruturais para avaliar um determinado dano;
- A identificação da existência e localização de um dano pode ser realizada por meio de aprendizado não supervisionado, mas para identificar o tipo de dano e seu grau é necessário um aprendizado supervisionado;
- A coleta e processamento de dados são necessários para converter informações relevantes e livres de ruídos;
- Alterações na dinâmica do sistema podem ser utilizadas para dimensionar o dano, sendo essa relação inversamente proporcional à faixa de frequência de excitação.

2.4 Algoritmo de Seleção Negativa

Pesquisadores especializados em informática começaram a se inspirar em fenômenos naturais para desenvolver maneiras eficazes de resolver problemas em várias áreas. Entre eles, destacam-se aqueles que exploram os mecanismos de defesa do corpo humano, buscando conceitos e teorias que permitam o desenvolvimento de novos algoritmos e técnicas para resolver problemas (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.). Surgiram propostas, arquiteturas e modelos baseados em princípios imunológicos para o desenvolvimento de ferramentas computacionais, que representam funcionalidades, propriedades e mecanismos dos sistemas imunológicos biológicos. Essas ferramentas são conhecidas como Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

O Algoritmo do Sistema de Negativação (ASN) é o principal método utilizado no SIA para detectar mudanças nos estados de sistemas computacionais. Essa técnica se inspira no processo de seleção negativa de linfócitos T no timo, o qual representa a discriminação entre células próprias e não próprias no organismo. O ASN é um modelo computacional baseado no processo de reconhecimento de padrões do sistema imunológico biológico e é executado em duas fases, conforme descrito abaixo (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

Para avaliar a semelhança entre as cadeias (antígeno e anticorpo) e determinar se são similares, utiliza-se um critério chamado de "casamento". O casamento pode ser perfeito ou parcial, sendo que o casamento perfeito ocorre quando duas cadeias são idênticas. Neste trabalho, optou-se por utilizar o conceito de casamento parcial, onde apenas uma parte das posições entre os padrões precisa ter o mesmo valor para confirmar o casamento. Essa quantidade é conhecida como taxa de afinidade (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

Temos duas principais etapas, sendo elas:

- Módulo de sensoriamento: Este procedimento será dividido em duas etapas, leitura dos sinais, que criará os detectores e o módulo de sensoriamento, onde será escolhido os sinais aleatoriamente e será verificado o casamento em relação ao conjunto de detectores próprios. Caso o critério de afinidade seja satisfeito, os sinais serão rejeitados, pois possuía características próprias. Caso contrário, os sinais serão armazenados no conjunto de detectores de falhas que serão utilizados no monitoramento do sistema.

- Módulo de monitoramento: dividida em três etapas: módulo de entrada ou leitura dos sinais (via sistema de aquisição de dados simulados), módulo de detecção, responsável por realizar a discriminação próprio/não-próprio, identificando as falhas, e, finalmente, o módulo de classificação, responsável por caracterizar as falhas estruturais

2.5 Filtro de Wiener

Com o progresso da tecnologia e o crescimento dos meios de comunicação, se torna necessário a análise de dados e essa por sua vez precisa ser cada vez mais rápida, objetiva e eficaz. (DANIELE, V. G. and Zich, R.)

Nesse sentido o processamento digital de sinais procura melhorar a qualidade do mesmo difundido no processo com o uso de filtros adaptativos. Por essa razão, nos últimos anos se tem crescido as técnicas de controle ativo de ruído através do uso desses filtros adaptativos, que buscam melhorar os sinais analisados.

O filtro de Wiener (FW), é uma transformada que se baseia no princípio da minimização do erro quadrático médio, estabelecido pelo conhecimento do espectro do sinal puro e do ruído. (DANIELE, V. G. and Zich, R.)

Com isso, dados e sinais sendo eles uniformes ou não, podem ser sintetizados em um guia de onda com descontinuidades sem-infinitas. Filtro de Wiener é tido como um procedimento sofisticado que explora as propriedades das funções analíticas e se destaca como uma das invenções matemáticas mais importantes para a obtenção de soluções analíticas de problemas complexos. (DANIELE, V. G. and Zich, R.)

As principais aplicações do filtro de Wiener incluem:

Restauração de imagem: Em processamento de imagem, o filtro de Wiener é usado para remover ruídos de imagens, preservando características importantes. Ele é eficaz em situações onde o modelo do ruído é conhecido ou pode ser estimado.

Cancelamento de eco: Em comunicações, o filtro de Wiener pode ser usado para remover o eco em sistemas de comunicação que sofrem de atrasos de propagação, como em chamadas telefônicas ou videoconferências.

Processamento de sinais em tempo real: É utilizado em uma variedade de aplicações, como processamento de voz, radar, sonar e processamento de sinais biomédicos, para extrair sinais importantes e reduzir a interferência causada pelo ruído.

Equalização de canal: Em sistemas de comunicação, o filtro de Wiener é usado para compensar distorções introduzidas pelo canal de comunicação, melhorando a qualidade do sinal recebido.

Estimação espectral: Pode ser usado para estimar o espectro de um sinal, separando-o do ruído e permitindo análises mais precisas de sinais em ambientes ruidosos.

Processamento de áudio: Em aplicações de áudio, como filtragem de áudio, remoção de ruído em gravações, cancelamento de eco em sistemas de comunicação e melhoria da qualidade do som em sistemas de reprodução.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise da estabilidade do sistema dinâmico do trem MAGLEV, foram feitas simulações para análise de sinais com algoritmo de seleção negativa e posteriormente foram feitas com o Filtro de Wiener para que fosse possível comparar os resultados e entender qual forma de análise seria mais eficaz.

3.1 Comparação entre o Algoritmo de Seleção Negativa com e sem o Filtro de Wiener

Para ambas as simulações foram usadas um banco de dados com um total de 310 sinais, sendo eles, 200 sinais com falha e 110 sinais normais.

Como na literatura é definido que a taxa de afinidade não deve ser menor que 70% para o ASN, foi feita uma comparação com a utilização da transformada de Wavelet e utilizando uma taxa de afinidade de 60% para que os sinais não ficassem muito parecidos.

Por esta razão foram feitas novas simulações com o Algoritmo de Seleção Negativa para que os resultados obtidos fossem comparados com os resultados encontrados com as novas simulações contendo o Filtro de Wiener, que este por sua vez atua como um filtro acústico.

ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA							
SINAL		CASO	TAF(%)	ACERTO(%)	DESVIO SINAL	DESVIO GERAL	TEMPO DE PROCESSAMENTO
Normal	7	1	70	54,02	4,850960373	1,207981757	2,534369
Falha	80						
Normal	40	2	70	70	3,570032352	1,207981757	2,341443
Falha	60						
Normal	70	3	70	71,43	1,623765308	1,207981757	2,633699
Falha	70						
Normal	85	4	70	77,78	1,623906078	1,207981757	4,16783
Falha	50						
Normal	110	5	70	67,74	3,6444	1,208	3,693428
Falha	200						
Normal	5	6	70	33,33	1,624239883	1,207981757	2,473584
Falha	10						

QUADRO 1. Dados completos das simulações com ASN

O filtro de Wiener é um filtro ótimo linear usado para estimar um sinal desconhecido a partir de um sinal observado, sujeito a ruído estocástico. Foi desenvolvido por Norbert Wiener na década de 1940 e é amplamente utilizado em áreas como processamento de sinais, comunicações, processamento de imagens e controle estatístico.

Abaixo foram feitas simulações para analisar os sinais com o filtro de wiener e após comparar com os resultados das análises com o algoritmo de seleção negativa.

Vale ressaltar que a taxa de afinidade foi colocada no sistema de análise como uma função que dependia de algumas variáveis, por essa razão não foi colocado um valor fixo neste caso. Mas no caso do Algoritmo de Seleção Negativa foi colocado 70%, como falado acima.

FILTRO DE WIENER							
SINAL		CASO	TAF(%)	ACERTO(%)	DESVIO SINAL	DESVIO GERAL	TEMPO DE PROCESSAMENTO
Normal	7	1	8,046	66,67	3,37E+08	4,92E+09	0,917330
Falha	80						
Normal	40	2	40	86	2,80E+02	4,92E+09	0,972240
Falha	60						
Normal	70	3	50	129,29	1,23E+03	4,92E+09	1,358464
Falha	70						
Normal	85	4	60	162,96	1,33E+03	4,92E+09	1,481714
Falha	50						
Normal	110	5	35,4839	91,94	18,57568267	4,92E+09	2,500515
Falha	200						
Normal	5	6	33,3333	66,67	1,56E+03	4,92E+09	0,614529
Falha	10						

QUADRO 2. Dados completos das simulações com Filtro de Wiener

Pode-se notar que a taxa de afinidade dos dados analisados é extremamente baixa, e é usado para avaliar a semelhança entre as cadeias (antígeno e anticorpo) e determinar se são similares, utiliza-se um critério chamado de "casamento". Neste trabalho como foi falado optou-se por utilizar o conceito de casamento parcial, onde apenas uma parte das posições entre os padrões precisa ter o mesmo valor para confirmar o casamento. Essa quantidade é conhecida como taxa de afinidade (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

Também é possível notar que em dois dos casos simulados a porcentagem de acerto passou do 100%, e isso quer dizer que houve em algum momento da simulação algum erro, o que nos mostra que não foi muito eficaz esse método de análise.

4. CONCLUSÃO

Como foi visto, o trem MAGLEV possui uma tecnologia de ponta e que pode ser extremamente útil para a sociedade atual, desde que ela tenha sua estrutura inteira para que quando alcance altas velocidades não cause nenhum tipo de problema aos humanos ou ao meio ambiente. Por esta razão o primeiro passo do trabalho foi analisar a sua estabilidade e a partir disso foi feita a análise de sinais. (NELSON, D. L.; COX, M. M. Leningher)

Com a teoria de sistemas imunológicos biológicos, foi possível aplicar em simulação a análise por meio do algoritmo de seleção negativa, e como resultado foi possível observar que de certa forma não é tão eficaz pelo fato do desvio de sinal ser grande e do tempo de processamento ser longo. Pois como falado, o desvio do sinal é importante para garantir a precisão e eficiência das análises. (FARRAR, C. R.; WORDEN, K.)

Nesta comparação o Algoritmo de Seleção Negativa se mostrou mais eficiente para se analisar um sinal no tempo do que o próprio filtro de Wiener. Afinal o Algoritmo do Sistema de Negativação (ASN) é o principal método utilizado no SIA para detectar mudanças nos estados de sistemas computacionais. (DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J.).

Portanto, pode-se concluir que para uma primeira análise das simulações foi possível notar que ao utilizar o Filtro de Wiener não chegamos a resultados tão efetivos e confiáveis quando se diz respeito a análise de sinais no tempo, por conta de que sua principal função é atuar como um filtro acústico, e com isso é uma ferramenta poderosa em várias áreas onde a extração de sinais importantes de ruídos é essencial. Suas aplicações são vastas e abrangem uma ampla gama de campos, desde comunicações até processamento de imagens e áudio. (DANIELE, V. G. and Zich, R.)

5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família e amigos por todo apoio durante esse tempo de aprendizado; Ao professor Fábio por toda a ajuda, auxílio e por todo o conhecimento passado ao longo desta pesquisa, e também gostaria de agradecer à agência FAPESP por todo auxílio financeiro ao longo desta pesquisa, afinal por meio deste estou tendo a oportunidade de publicar os artigos em congressos nacionais renomados na área da engenharia mecânica.



4. REFERÊNCIAS

- CABRAL, T. D. F., Dinâmica e Controle de um Sistema MAGLEV. Tese (Pós-graduação) - *Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP*, 2015
- DAVID, E. O futuro das estradas de ferro no Brasil. 1. ed. [S.l.]: *Portifolium*, 2009.
- DANIELE, V. G. and Zich, R. (2014). The Wiener-Hopf method in electromagnetics. *SciTech Publishing Incorporated*.
- DE CASTRO, L. N. and Von Zuben, F. J. (1999). Artificial immune systems: Part i {basic theory and applications. *Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de, Tech. Rep.*
- DELMONT FILHO, O. (2007). Um algoritmo para detecção, localização e classificação de distúrbios na qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet. *PhD thesis, Universidade de São Paulo*.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction of structural health monitoring: *philosophical transactions of the royal society A*. 2006.
- FERNANDES, M. G. et al. (1999). Estatística aplicada.
- HAYKIN, S. Sistemas de comunicação: analógicos e digitais. 4ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- LEE, H.-W.; KIM, K.-C.; LEE, J. Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 42, n. 7, p. 1917–1925, July 2006.
- LEHNINGER, T. M., NELSON, D. L. & COX, M. M. Princípios de Bioquímica. 6ª Edição, 2014. Ed. Artmed
- LIMA, F. P. A.; CHAVARETTE, F. R.; SOUZA, A. S. E.; SOUZA, S. S. F.; LOPES, M. L. M. Artificial immune systems applied to the analysis of structural integrity of a building. *Applied Mechanics and Materials*, Yandong Wang, v. 472, p. 544-549. 2014.
- MONTEIRO, L.H.A, Sistemas Dinâmicos. São Paulo, Brasil, *Editores Livraria da Física*, 2002.
- MOTTA, E. S. Otimização de trilho magnético de um sistema de levitação supercondutora para veículo Maglev. Tese (Doutorado)—*Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ*, Novembro 2011.
- NELSON, D. L.; COX, M. M. Leningher Princípios de Bioquímica. 7. Ed. Barcelona Omega, 2015.
- ZHAO, F.; THORNTON, R. Automatic design of a maglev controller in state space. p. 2562–2567, 1992.
- ZHENG, S.; WANG, X.; LIU, L. Damage detection in composite materials based upon the computational mechanics and neural networks. *In: EUROPEAN WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2004, Munich. Proceedings [...] [S. l.: s. n.], 2004.*

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.