

# Uso de Tabelas de Decisão Adaptativas em Redes de Sensores Sem Fio

(15 dezembro 2009)

L. Gonda, C. E. Cugnasca, J.J. Neto

**Abstract**— Devido ao avanço de diversas tecnologias as Redes de Sensores Sem Fio têm se tornado uma importante tecnologia no monitoramento de diversas aplicações, tais como militar, agricultura, monitoramento de pacientes e outras. Devido à limitação de recursos, essas redes, ao contrário das redes tradicionais, trabalham de maneira colaborativa e os protocolos de comunicação devem se preocupar não só com o transporte de dados, mas também com o consumo de energia na transmissão. Estas redes possuem um comportamento dinâmico, além de serem capazes de se auto-organizarem, pois muitas vezes não é possível a troca de suas baterias ou estão localizadas em locais de difícil acesso. Este trabalho apresenta uma proposta de utilização de grafos dinâmicos e Tabelas de Decisão Adaptativas na modelagem e controle de topologia em RSSF.

**Palavras chave**— *Controle de Topologia, Grafos Dinâmicos, Redes de Sensores Sem Fio, Tabelas de Decisão Adaptativa.*

## I. INTRODUÇÃO

UMA Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é composta por diversos módulos distribuídos, denominados de nós sensores, que possuem capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação [1]. Esta tecnologia foi viabilizada pela evolução de diversas áreas, em especial comunicação sem fio, microprocessadores e dispositivos eletromecânicos, possibilitando que pequenos dispositivos, dispostos em uma área a ser monitorada, pudessem reproduzir, p de sensoriamento, processamento e comunicação com outros nós, fenômenos físicos com mais precisão [2]. Diversas aplicações para RSSF estão surgindo, incluindo medicina, agricultura, controle de ambientes, militar, entre outras [3].

Em geral, os recursos dos nós sensores apresentam limitação em relação à capacidade de processamento, armazenamento, de energia e de alcance do seu rádio de comunicação. Conseqüentemente, os nós sensores devem ser agrupados para executarem tarefas de maneira colaborativa, pois individualmente não são muito eficazes.

Uma das características essenciais em uma RSSF é a capacidade de auto-organização.

Dessa forma, ao serem espalhados em grandes quantidades

em uma área de monitoramento, os nós sensores devem se organizar automaticamente, para que seja estabelecida a comunicação entre os diversos dispositivos da rede [3]. É importante ressaltar que a auto-organização é necessária, não somente no instante em que a rede está sendo criada, mas também na manutenção da rede, devido a possíveis mudanças em decorrência de falhas e inserção de novos nós sensores.

Com a finalidade de manter as funções da rede e economizar recursos, especialmente energia, a utilização de mecanismos para manutenção e prevenção a falhas são extremamente importantes em protocolos de comunicação para RSSF. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta inicial de utilização de Tabelas de Decisão Adaptativas (TDA) no desenvolvimento de mecanismos de comunicação para RSSF.

O restante deste trabalho está organizando conforme descrito a seguir. A Seção II mostra alguns trabalhos relacionados à comunicação e manutenção em RSSF. Na Seção III são apresentadas as definições de grafos dinâmicos e Tabelas de Decisão Adaptativas, bem como características de RSSF que demonstram a necessidade de um dinamismo em suas organizações e topologias. Por fim, na Seção IV são apresentadas as considerações finais do trabalho.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Na transmissão de dados em uma RSSF, ao contrário do que acontece nas redes tradicionais, como a Internet, por exemplo, além de se preocupar com o envio de informações, os protocolos de comunicação devem levar em consideração também o consumo de energia, já que na maioria das vezes os nós sensores são alimentados por baterias, que possuem carga limitada [2].

Devido à limitação de recursos nos nós sensores, o estudo de mecanismos e protocolos para gerenciamento em RSSF, tais como, manutenção de topologia em RSSF, cobertura da área a ser monitorada e redução de falhas são importantes para prolongar o funcionamento da rede, sem que haja nenhuma intervenção externa, principalmente, em casos em que os nós sensores estão dispostos em locais de difícil acesso.

Neste sentido, diversos protocolos e mecanismos para controle de topologia foram propostos na literatura. Por

---

C.E. Cugnasca e J. J. Neto são docentes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo ([carlos.cugnasca@poli.usp.br](mailto:carlos.cugnasca@poli.usp.br), [joao.jose@poli.usp.br](mailto:joao.jose@poli.usp.br))  
L. Gonda é Doutorando na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e docente da Universidade Católica Dom Bosco ([gonda.ucdb@gmail.com](mailto:gonda.ucdb@gmail.com)).

exemplo, Sun *et. al.*[4] apresentam um mecanismo denominado de REMUDA, que tem por objetivo a construção e manutenção de topologias em RSSF. Neste mecanismo cada nó da rede possui um nó denominado de pai, para quem o mesmo deve enviar as informações coletadas. Para garantir o funcionamento do mecanismo, os nós devem enviar periodicamente informações de controle para os nós pais. Caso algum envio detecte alguma falha, o mesmo deve iniciar o processo de escolha de um novo nó pai.

Outro mecanismo de disseminação de dados é apresentado por Figueiredo, Nakamura e Loureiro [5]. Este mecanismo é denominado de Multi e corresponde à utilização alternada de dois outros protocolos: SID (*Source-initiated Dissemination*) e EF-Tree (*Earliest First Tree*).

Em [5], Gonda *et al.* apresentam uma proposta de uso de Tecnologia Adaptativa (TA) em RSSF utilizando grafos dinâmicos. Entretanto, além da utilização de grafos dinâmicos são necessários mecanismos mais eficientes para melhorar o processo de Controle de Topologia. Neste trabalho, os autores descrevem formalmente um grafo dinâmico como um dispositivo adaptativo e um algoritmo dividido em duas etapas: construção da topologia e manutenção da topologia.

### III. DISPOSITIVOS ADAPTATIVOS UTILIZADOS

Um dispositivo formal é dito adaptativo sempre que o seu comportamento muda dinamicamente, em resposta a estímulos de entrada, sem a interferência de agentes externos, incluindo seus usuários.

Em sua formulação geral, os dispositivos adaptativos são caracterizados por meio de suas camadas conceituais: o formalismo subjacente (ou dispositivo subjacente) e o mecanismo adaptativo (ou camada adaptativa) [6].

O formalismo subjacente é representado por um dispositivo guiado por regras (formalismo convencional, não-adaptativo) e opera, movendo-se de uma configuração para outra, sucessivamente, em resposta a estímulos recebidos em sua entrada.

Tais movimentos são definidos por um conjunto de regras que mapeiam cada possível configuração em uma configuração seguinte correspondente. O mecanismo adaptativo responde pelas mudanças incrementais no comportamento do dispositivo subjacente. As propriedades de auto-modificação são representadas pelas funções e ações adaptativas, capazes de alterar o conjunto de regras do dispositivo subjacente, determinando assim, conseqüentemente, seu comportamento independente de decisões externas a partir de então. Na literatura existem diversos dispositivos adaptativos, porém, somente os grafos dinâmicos e as Tabelas de Decisão Adaptativas serão descritas neste trabalho.

#### A. Grafos Dinâmicos

Uma RSSF pode ser representada como um grafo ou como uma árvore. Neste trabalho, optou-se por utilizar um grafo direcionado para representar a estrutura da RSSF.

Entretanto, na maioria das aplicações de algoritmos em grafos, os grafos são dispositivos estáveis que sofrem pouca ou nenhuma mudança. Em um grafo que representa uma RSSF, este tipo de dispositivo estável não pode ser utilizado devido à necessidade de mudanças que podem ocorrer durante o tempo de vida da rede. Neste sentido, são necessárias alterações na estrutura de um grafo, como inserção e remoção de arestas, mudança no estado dos vértices (que pode ser representado por mudanças na coloração dos mesmos).

Baseado na definição de Neto [6], pode-se definir um dispositivo adaptativo que usa um grafo como formalismo subjacente (não-adaptativo). Embora o dispositivo formal apresentado em [6] seja uma 5-upla, um grafo dinâmico para modelar o comportamento de uma RSSF não precisa de todos os conjuntos e símbolos. O conjunto A (que define aceitação) não é utilizado, pois os estímulos e eventos que podem ocorrer na RSSF são infinitos e não há final de entrada, ou seja, a cadeia de estímulos  $w$  é infinita. Dessa forma, um dispositivo adaptativo que utiliza um grafo como formalismo subjacente pode ser definido como uma 4-upla  $ND = (C; NR; S; c_0)$  na qual:

- ND: corresponde ao grafo que modela a RSSF em questão;
- C: conjunto de possíveis configurações do grafo que modela a RSSF.  $c_0$  é sua configuração inicial, ou seja, a configuração que é montada inicialmente com base nas regras de conexão da RSSF;
- NR: conjunto de regras que definem o grafo ND pela relação  $C \times S \times C$ . Neste caso, as regras  $r \in NR$  têm a forma  $r = (c_i; s; c_j)$ , indicando que, em resposta a um estímulo de entrada  $s \in S$ , a regra  $r$  altera a configuração corrente  $c_i$  do grafo para configuração  $c_j$ . Neste caso, a mudança de configuração representa uma alteração na topologia da RSSF;
- S: conjunto (finito) de todos os possíveis eventos válidos e considerados como estímulos de entrada para ND. Neste caso,  $\epsilon$  também é desconsiderado, pois o estímulo “vazio” não provoca alterações na RSSF.

É importante observar que o grafo dinâmico é utilizado para representar graficamente a RSSF, porém, as mudanças na rede são provocadas por estímulos que são analisados e configurados através de uma Tabela de Decisão Adaptativa, descrita na próxima seção.

#### B. Tabela de Decisão Adaptativa

As Tabelas de Decisão Adaptativas (TDA) podem ser consideradas uma versão adaptativa das Tabelas de Decisão Convencionais, que são utilizadas nas mais diversas áreas com o objetivo de auxiliar na descrição de problemas complexos, além de se mostrarem mais eficientes do que outras formas de expressão, tais como narrativas, escritas, diagramas e outras[7].

Uma Tabela de Decisão Convencional ou Não-Adaptativa (TDN) é composta por condições, ações e regras e pode ser dividida em quatro partes [7]:

- Linha das condições: corresponde a uma variável

do problema que será avaliada no processo de decisão e cujo valor está presente na lista de valores das condições;

- Possíveis valores das condições: neste item são apresentados todos os possíveis valores que as condições podem assumir;
- Linha das ações: conjunto de procedimentos ou operações a serem executadas de acordo com as condições;
- Ações a serem tomadas: as ações a serem tomadas após a avaliação das regras.

É importante observar que as condições assumem valores binários do tipo falso (F) ou verdadeiro (V) para uma determinada regra  $R_k$ . Quando isto ocorre indica que a condição é verificada para esta regra e caso alguma ação deva ser tomada, é necessário fazer a sinalização. A Tabela I mostra um exemplo de uma Tabela de Decisão na qual o *firewall* de uma rede deve tomar decisões baseadas nas informações de pacotes.

TABELA I  
EXEMPLO DE UMA TABELA DE DECISÃO

	V	F	V	V	F
Endereço IP de Origem Confiável	V	F	V	V	F
Endereço IP de Destino Confiável	V	V	F	V	F
Porta de Destino Confiável	V	V	F	V	V
Liberar Pacote	X				
Encaminhar Pacote			X		

Na Tabela I, as regras são apresentadas na parte superior e as ações são representadas na parte inferior da tabela. Quando uma ação a ser tomada é representada por um X, significa que a mesma será executada caso as condições possuam o valor correspondente de sua coluna. Quando a célula de ações é deixada em branco significa que nenhuma ação será tomada para aquela regra específica.

Após visualizar brevemente uma Tabela de Decisão Convencional, é possível definir uma TDA. A TDA proposta em [6] utiliza como dispositivo subjacente uma Tabela de Decisão Convencional e uma camada adaptativa composta por linhas que correspondem às funções adaptativas. Dessa forma, as colunas da TDA correspondem às regras da mesma. Sempre que uma função adaptativa é executada, o número de regras é alterado e, conseqüentemente, o número de colunas da TDA é alterado.

Portanto, uma TDA que representa uma RSSF pode ser definida como uma dupla  $TDA = (TDN, CA)$ , na qual TDN é a Tabela de Decisão Não Adaptativa e CA é o mecanismo adaptativo [7]. A TDN que modela uma RSSF pode ser definida como 5-upla:  $TDN = (CT, NRT, CV, t_0, CRA)$ , na qual:

- CT: é o conjunto de todas as possíveis configurações da Tabela de Decisão, que corresponde ao estado da RSSF;
- $NRT \subseteq CT \times CV \times CT \times CRA$  é o conjunto de regras de decisão da tabela para verificar possíveis mudanças na RSSF;
- CV é o conjunto finito de valores válidos das condições para a RSSF;

- $t_0$  é a configuração inicial da tabela, que correspondem a todas as ações, regras e condições existentes para a RSSF;
- CRA é o conjunto finito dos possíveis resultados obtidos pela execução das ações quando da aplicação das regras NRT;
- cada regra  $rt \in NRT$  é da forma  $rt = (t_i, cv, t_j, r)$ , na qual com a entrada de valores das condições  $cv \in CV$ , a regra  $rt$  gera a resposta  $r \in CRA$  e muda a configuração da tabela corrente  $t_i$  para a tabela  $t_j$ .

É importante observar que esta definição é baseada na definição apresentada por [7], porém, o conjunto AT não é necessário para as RSSFs.

Para um melhor entendimento de uma TDA, a Tabela II apresenta a Estrutura Geral de uma TDA, baseada na proposta por Neto [6].

TABELA II  
ESTRUTURA GERAL DE UMA TABELA DE DECISÃO ADAPTATIVA [7]

Linha de cabeçalho (tag)	Coluna das funções adaptativas	Coluna das regras
Linha das condições	Declaração das funções adaptativas	Valores das condições
Linha das ações		Ações a serem aplicadas
Linha das funções adaptativas		Ações adaptativas a serem executadas

Na Tabela II, as Linhas das Condições e das Ações correspondem à estrutura da Tabela de Decisão não Adaptativa, enquanto a linha das funções adaptativas corresponde à Camada Adaptativa do mecanismo.

### C. Tabela de Decisão Adaptativa Estendida

Na seção anterior, foi apresentada a estrutura geral de uma Tabela de Decisão Adaptativa. Entretanto, apesar de o objetivo do Controle de Topologia em RSSF ser único (aumentar o tempo de vida da rede), existem diversos critérios que podem ser levados em consideração. Dessa forma, é necessário realizar uma extensão da Tabela Adaptativa apresentada na Seção 2.B para que múltiplos critérios possam ser levados em consideração.

Neste sentido, esta seção apresenta inicialmente alguns conceitos envolvendo decisões multicritério e, em seguida, apresenta a estrutura de uma Tabela de Decisão Adaptativa Estendida (TDAE).

Segundo Tchemura [7] APUD Fülöp [8], os métodos multicritério possibilitam uma maior compreensão dos problemas relacionados com decisão que apresentam um número finito de critérios e alternativas. Além disso, estes métodos apoiam os processos de análise de decisão, especialmente quando estes são inseridos em conceitos multidisciplinares.

Os métodos multicritério podem ser classificados como de escolha, classificação ou ordenação das alternativas existentes nos problemas. Os métodos de escolha permitem que apenas uma alternativa seja escolhida de um subconjunto de opções, enquanto os métodos de classificação permitem que mais de uma alternativa seja escolhida. A diferença entre eles é que os métodos de classificação em geral distribuem cada alternativa

em uma categoria, enquanto os métodos de ordenação estabelecem uma ordem de preferência entre as diversas alternativas[7].

No caso da aplicação em RSSF, como só existe uma topologia possível por vez, é necessário que o método multicritério a ser utilizado seja o de escolha. Dessa forma, sempre que houver alguma mudança na topologia da rede, dentre as possíveis alternativas, apenas uma delas será escolhida para tentar melhorar o desempenho da mesma.

Após verificar conceitos básicos de multicritérios, será apresentada agora uma extensão da TDA, denominada de Tabela de Decisão Adaptativa Estendida (TDAE). A TDAE tem por objetivo apoiar processos decisórios semi-estruturados, com aplicação de multicritérios, possibilitando ao decisor obter soluções viáveis para o problema, por meio da análise e interação com o sistema[7].

Para um melhor entendimento, a Figura 1 apresenta a estrutura geral de um TDAE.

		AÇÕES ADAPTATIVAS			REGRAS				
		$\dots$	$A_{Dj}$	$\dots$	$r_1$	$\dots$	$r_j$	$\dots$	$r_n$
TABELA DE DECISÃO CONVENCIONAL	CRITÉRIOS	$c_1$			Valores dos critérios $d_{ij}$				
	ALTERNATIVAS	$a_1$			Ações a serem aplicadas $x_{ij}$				
Conjunto de funções auxiliares	FUNÇÕES	$FM_1$			Funções auxiliares a serem chamadas				
		$FM_q$							
CAMADA ADAPTATIVA	FUNÇÕES ADAPTATIVAS	$FAD_1$			Ações adaptativas a serem executadas				
		$FAD_2$			Referências a $FAD_i$				
		$FAD_i$							
		$FAD_n$							

conjunto de ações adaptativas elementares que compõem  $FAD_i$

Figura 1. Estrutura Geral de uma Tabela de Decisão Estendida[7].

Formalmente, uma TDAE pode ser definida como uma tripla  $TDAE = (TDA, FM, M)$ , na qual TDA é a Tabela Adaptativa apresentada na Seção 2.B, FM é o conjunto de Funções Auxiliares e M é o método multicritério adotado para um particular problema [7].

No caso das RSSF, a TDAE funcionará como um decisor, que deverá apresentar uma solução para otimizar o controle de topologia da mesma.

#### IV. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto é baseado na proposta apresentada em [5]. O algoritmo é dividido em duas fases: construção da topologia inicial e manutenção da topologia através de ações adaptativas. É importante observar que a escolha de uma topologia consiste na mudança de configuração tanto do grafo que representa a RSSF, como também, da TDAE.

Na fase de construção da topologia do algoritmo é responsável por determinar a topologia inicial da RSSF, de maneira que as informações coletadas pelos nós possam ser

encaminhadas ao nó *gateway*. Inicialmente existe um conjunto de vértices que estão isolados. Como o objetivo é fazer com que as informações possam ser enviadas para o *gateway*, este nó é responsável por enviar uma mensagem do tipo *inicio* na RSSF. Esta mensagem é responsável por detectar os nós existentes, bem como, determinar quais nós participarão da RSSF inicialmente. Ao receber uma mensagem do tipo *inicio*, cada nó escolhe o nó remetente como pai (cria-se uma aresta entre os dois nós) e encaminha esta mensagem através de *broadcast*. É importante observar que um nó pode receber a mensagem de *inicio* de mais de um nó. Neste caso, o nó apenas cria uma aresta entre o nó emissor e ele mesmo, porém coloca-a como inativa (neste caso a mensagem *inicio* não é enviada para os demais nós).

Após esta fase, são montadas as configurações  $c_0$  e  $t_0$ , do Grafo Dinâmico e da TDAE, respectivamente. Nesta etapa, são definidos também os critérios, regras e alternativas iniciais a serem adotados.

No caso de uma RSSF, possíveis critérios seriam, nível de energia, potência do nó, número de vizinhos, função do nó na rede roteador ou não), dentre outros. Estes seriam os critérios iniciais e de acordo com seus valores, poderia haver ou não mudanças na topologia da rede. Caso alguma regra não seja encontrada, a TDAE cria uma nova regra, por meio das Funções Adaptativas para que a topologia da rede seja mantida.

#### V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia de RSSF tem se tornado cada vez mais presente e importante em aplicações de monitoramento nas mais diversas áreas. Entretanto, a limitação de recursos, em especial, a energia é um fator que vem se destacando, principalmente, no desenvolvimento de algoritmos de comunicação que permitam uma melhor utilização dos recursos de bateria, sem que haja perdas na comunicação.

Além da restrição de energia, um dos fatores que pode influenciar na comunicação em RSSF é o dinamismo da topologia, devido a mecanismos de prevenção e manutenção que são inerentes ao comportamento da rede.

Dessa forma, a modelagem do comportamento dinâmico de uma RSSF em dispositivo adaptativo é um desafio importante do ponto de vista da aplicação de TA.

Para a modelagem do comportamento da rede, podem ser utilizados os Grafos Dinâmicos, enquanto a TDAE permite que, por meio de um método decisório de escolha, uma nova topologia seja escolhida baseando-se em multicritérios. Além disso, a TDAE permite que caso algum comportamento não previsto pelo algoritmo seja encontrado, funções adaptativas possam ser executadas para garantir que novas regras sejam incorporadas e a topologia da rede seja reconfigurada da melhor maneira possível.

Portanto, a TA pode ser aplicada em RSSF, garantindo que o comportamento dinâmico da mesma seja modelado adequadamente. Uma das coisas a serem levadas em consideração ainda é o tempo de processamento e a memória a ser utilizada para que estes dispositivos funcionem

adequadamente .

#### REFERÊNCIAS

1. I. F. Akyildiz et al. "Wireless Sensor Networks: a survey", *Computer Networks*, 2002, v. 38, n. 4, pp. 393-422.
2. D.Cueller, D. Estrin, M. Srivastava. "Overview of Sensor Networks". *IEEE Computer Society*, 2004, pp. 41-49.
3. P. Baronti et al. "Wireless Sensor Networks: a survey on the state of the art and the IEEE 802.15.4 and Zigbee Standards", *Computer Communications*, 2007, v.30, pp. 1655-1695.
4. L. Sun, T. Yan, Y. Bi. "REMUDA: A Practical Topology Control and Data Forwarding Mechanism for Wireless Sensor Networks", *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2006, v. 36, n. 6, pp. 867-874.
5. L. Gonda et al. "Aplicação de Tecnologia Adaptativa em Redes de Sensores Sem Fio", in *Proc. Workshop de Tecnologia Adaptativa, 2009*.
6. J. J. Neto, "Adaptative rule-driven devices - general formulation and a case study," in *CIAA'2001 Sixth International Conference on Implementation and Application of Automata*, Pretoria, South Africa, July 2001, pp. 234-250.
7. A. H. Tchemura, "Tabela de Decisão Adaptativa na Tomada de Decisão Multicritério", Tese de Doutorado, orientada por João Jose Neto, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Junho, 2009.
8. J. Fülöp. *Introduction to Decision Making Methods. Laboratory of Operations Research and Decision Systems*, Computer and Automation Institute. Hungarian: Academy of Sciences, 2005.

[10]

[11]



**Luciano Gonda** é graduado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (1999) e mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2004). Atualmente, é aluno de doutorado da Escola Politécnica da USP, sob a orientação do Prof. Carlos Eduardo Cugnasca. É membro do Laboratório de Automação Agrícola da Escola Politécnica da USP e do Grupo de Pesquisa em Engenharia e Computação da UCDB e professor da Universidade Católica Dom Bosco (UCDB). Tem experiência na área de Ciência da

Computação, e seus interesses em pesquisa concentram-se em Redes de Sensores Sem Fio, Algoritmos Paralelos e Distribuídos e Redes de Computadores.



**Carlos Eduardo Cugnasca** é graduado em Engenharia de Eletricidade (1980), mestre em Engenharia Elétrica (1988) e doutor em Engenharia Elétrica (1993). É livre-docente (2002) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e pesquisador do LAA - Laboratório de Automação Agrícola do PCS - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de Supervisão e Controle de Processos e Instrumentação, aplicadas a processos agrícolas e Agricultura de Precisão, atuando

principalmente nos seguintes temas: instrumentação inteligente, sistemas embarcados em máquinas agrícolas, monitoração e controle de ambientes protegidos, redes de controle baseados nos padrões CAN, ISO11783 e LonWorks, redes de sensores sem fio e computação pervasiva. É editor da Revista Brasileira de Agroinformática (RBIAGro).

[12]



**João José Neto** é graduado em Engenharia de Eletricidade (1971), mestre em Engenharia Elétrica (1975) e doutor em Engenharia Elétrica (1980). É livre-docente (1993) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e coordena o LTA - Laboratório de Linguagens e Tecnologia Adaptativa do PCS - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase nos Fundamentos da Engenharia da Computação, atuando principalmente nos seguintes temas: dispositivos adaptativos, tecnologia adaptativa, autômatos adaptativos, e em suas aplicações à Engenharia de Computação, particularmente em sistemas de tomada de decisão adaptativa, análise e processamento de linguagens naturais, construção de compiladores, robótica, ensino assistido por computador, modelagem de sistemas inteligentes, processos de aprendizagem automática e inferências baseados em tecnologia adaptativa.

[13]

[14]