

Uma análise ontológica do eletrocardiograma

DOI: 10.3395/reciis.v3i1.242pt



**Bernardo
Gonçalves**

Departamento de Ciência
da Computação, Univer-
sidade Federal do Espírito
Santo, Vitória, Brasil
bgoncalves@inf.ufes.br



**Veruska
Zamborlini**

Departamento de Ciência
da Computação, Univer-
sidade Federal do Espírito
Santo, Vitória, Brasil
veruska@inf.ufes.br

Giancarlo Guizzardi

Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil
gguizzardi@inf.ufes.br

Resumo

A bioinformática tem sido um campo fértil para aplicação da disciplina de ontologia formal. A representação com princípios de entidades biomédicas tem alimentado progressivamente a pesquisa biológica, com benefícios diretos que vão da reformulação das terminologias médicas à introdução de novas perspectivas para modelos aprimorados de Registros Eletrônicos de Saúde (RES). Este artigo apresenta uma análise ontológica do eletrocardiograma (ECG) independente de aplicação e fundamentada na Ontologia Fundamental Unificada. Com o objetivo de investigar o fenômeno subjacente a esse exame cardiológico, trabalhamos com os subdomínios da eletrofisiologia e anatomia do coração humano. Então delineamos uma Ontologia do ECG construída sobre a Ontologia Relacional OBO (Open Biomedical Ontology). Além disso, a ontologia de domínio esboçada aqui se inspira tanto no Modelo Fundamental de Anatomia como na Ontologia de Funções proposta sob o amparo do programa de pesquisa em Ontologia Geral Formal (OGF).

Palavras-chave

ontologia biomédica; eletrocardiograma; eletrofisiologia cardíaca

Introdução

O campo da Bioinformática está testemunhando a aplicação da *ontologia formal* (a disciplina) à representação de entidades biológicas (ex. Schulz & Hahn 2007) e a (re-organização das terminologias médicas também em virtude dos registros eletrônicos de saúde (RES) (ex.

Schulz et al. 2008). A motivação é (basicamente) estabelecer bases para (i) biólogos e médicos armazenarem e comunicarem informação biomédica e dados relativos a pacientes com eficiência; (ii) gradualmente integrarem esses recursos no desenvolvimento da próxima geração de aplicativos computacionais biomédicos baseados em

dados. Esses aplicativos destinam-se a oferecer suporte em ciência básica e pesquisa clínica, bem como na prestação de serviços de saúde mais eficientes. Conforme colocado por Rosse e Mejino Jr. (2003), “*tal foco ampliado em bioinformática é inevitável na era pós-genoma e o processo de fato já começou*”.

Uma iniciativa notável para reunir ontologias biomédicas seguindo princípios é a *Open Biomedical Ontologies (OBO) foundry* (Smith et al. 2007). Até agora ela consiste em 60 ontologias que, sem variar muito em termos de granulosidade, canonicidade e estágio de desenvolvimento, em que cada uma visa representar um objeto de estudo bem delimitado. Entre as ontologias mais consultadas do OBO, está o Modelo Fundamental de Anatomia (FMA) (Rosse & Mejino Jr. 2003). O FMA lida com a estrutura anatômica do corpo dos mamíferos (especialmente o humano). Entretanto, apesar do fato de que o domínio da eletrofisiologia do coração humano é de interessante significativo em Biomedicina, ainda falta uma ontologia da eletrofisiologia do coração na OBO, bem como na literatura de ontologia biomédica¹. Ademais, embora o eletrocardiograma (ECG) defina uma das formas notáveis de dados biomédicos, até onde sabemos, ele ainda não foi tratado na literatura da ontologia biomédica.

O ECG é o teste mais freqüentemente utilizado na Cardiologia para medir a atividade do coração (Geselowitz 1989). Nos últimos anos, tanto o armazenamento e a transmissão dos registros de ECG foram objeto de iniciativas de padronização. Entre os padrões de referência, pode-se recorrer a SCP-ECG², FDA XML³ ou HL7 ECG Mensagem de Notação v3⁴. Entretanto, o foco desses padrões é geralmente como dados e informações devem ser representado em sistemas de computador e transmissão de mensagens (Smith et al. 2007, p. 1252, Yu 2006, p. 254). Por outro lado, existe a necessidade de se concentrar na representação adequada da realidade biomédica sendo examinada (Smith 2006). Isto é, em *o que é o ECG*, tanto pelo lado do paciente como do médico. Isso é claramente relevante, já que o ECG, como um sinal vital, é uma peça importante na composição do RES de hoje e provavelmente no RES do futuro.

Nos últimos anos, temos lidado com o ECG como objeto de investigação ontológica. Um esforço inicial de representação de dados de ECG aplicando-se técnicas de ontologia formal resultaram em uma ontologia de domínio ECG preliminar relatada em (Gonçalves et al. 2007, Zamborlini et al. 2008). Desde então, temos revisado a base subjacente a esse empenho pioneiro. Isso nos levou a reformular nossa representação ontológica do ECG em prol de uma maior especialização, nível de detalhes, densidade e conectividade para citar os termos transmitidos por Rector et al. (2006, p. 335). Este artigo apresenta uma análise ontológica do eletrocardiograma (ECG) independente de aplicação. Nossa análise é baseada na Ontologia Fundamental Unificada (UFO) (Guizzardi & Wagner 2009). A UFO começou como uma unificação da OGF (Ontologia Formal Geral) (Heller & Herre 2004) e a ontologia de nível superior

de universais com base no OntoClean (<http://www.ontoclean.org>). Entretanto, conforme demonstrado em (Guizzardi & Wagner 2009), existem inúmeras questões problemáticas relacionadas ao objetivo específico de desenvolver fundamentos ontológicos gerais para modelagem conceitual que não são cobertas de forma satisfatória pelas ontologias fundamentais existentes como a OGF, DOLCE ou OntoClean. Por esse motivo, a UFO foi desenvolvida em uma ontologia de referência madura baseada em diversas teorias da Ontologia Formal, Lógica Filosófica, Filosofia da Linguagem, Linguística e Psicologia Cognitiva. Essa ontologia é apresentada com profundidade e formalmente caracterizada em (Guizzardi 2005). Neste artigo, apresentamos nossa caracterização formal dessa análise ontológica usando a Lógica de Primeira Ordem (FOL) padrão.

Empregando os resultados dessa análise ontológica, delineamos uma ontologia de domínio para o ECG que incorpora os subdomínios da eletrofisiologia e da anatomia do coração. A Ontologia de ECG também se utiliza de diversas teorias fundamentais existentes, a saber: (i) a Ontologia Relacional OBO, que fornece relações básicas a serem usadas nas ontologias biomédicas (Smith et al. 2005); (ii) o Modelo Fundamental de Anatomia (FMA), ao lidar com a anatomia humana para o ECG; (iii) a Ontologia de Funções (OF) desenvolvida sob o guarda-chuva do programa de pesquisa em Ontologia Geral Formal (OGF) (Burek et al. 2007) para lidar com as funções eletrofisiológicas do coração. Essa ontologia de ECG delineada é atualmente implementada com uma combinação da linguagem de representação OWL DL e sua extensão SWRL (Horrocks et al. 2005).

Materiais e métodos

Os princípios metodológicos para a engenharia ontológica vêm atraindo atenção crescente na literatura ontológica biomédica, cf. (Yu 2006). Na nossa análise ontológica do ECG, empregamos diversos princípios da engenharia ontológica e da ontologia fundamental, que também favorecem o raciocínio automático eficiente e a integração ontológica.

Engenharia ontológica

Empregamos uma abordagem de engenharia ontológica baseada na premissa de que promover uma ontologia de domínio (no contexto da IA) exige dois instrumentos ontológicos diferentes (Guizzardi & Halpin 2008), a saber, uma teoria do domínio de objeto bem fundamentada ontologicamente cujo propósito é ser fortemente axiomática para limitar o máximo possível o significado pretendido pela teoria e outra cujo propósito é ser uma ferramenta computacional para o raciocínio automatizado e recuperação de informação. Em Bittner e Donnelly (2007), os autores evidenciam uma linha análoga de argumento e propõem o uso de FOL como um formalismo para o primeiro e alguma espécie de Lógica Descritiva (DL) para a última. Seguimos a mesma escolha de linguagens de representação aqui, particularmente através do uso de OWL DL (espelhada para uma

DL) com a extensão SWRL para regras com a última (Horrocks et al. 2005). Além disso, como é tradicional em Engenharia Ontológica (Yu 2006, p.255), especificamos um conjunto de perguntas de competência para delimitar o escopo e o propósito do domínio que temos à mão. Essa técnica metodológica também é benéfica no fim do ciclo de desenvolvimento como forma de avaliar o instrumento resultante.

Engenharia ontológica

Chamamos atenção para o fato de que criar uma ontologia de domínio (Biomédica) com base em alguma fundamentação ontológica é útil a até necessário. Uma estrutura ontológica de nível superior não só fornece um suporte para a tomada de decisões ontológicas (Guarino & Welty 2002), mas também permite que tomemos decisões da forma mais transparente possível na ontologia de domínio resultante. Nosso estudo ontológico sobre ECG está fundamentado na estrutura de nível superior da UFO (Guizzardi & Wagner 2009). A UFO contém categorias ontológicas superiores (ex. resistente, persistente, tipo, papel, coletivo, relator e assim por diante) que são *demonstrados pelos* universais do domínio de ECG (ex. coração, registro de ECG).

Garantindo um raciocínio automatizado eficiente

Um dos principais objetivos práticos desta pesquisa é usar os resultados do nosso estudo ontológico de ECG para dar suporte ao raciocínio automatizado sobre os universais e particulares do ECG e eletrofisiologia do coração. Temos procurado (praticamente) o ponto ideal para expressar o máximo possível da teoria ontológica de ECG que desenvolvemos aqui em uma combinação do OWL DL e sua extensão SWRL, mantendo a decidibilidade e maneabilidade computacional. Como as lógicas de ordem superior comprometem o objetivo do raciocínio automatizado prático, as categorias UFO são expressas na implementação da ontologia de ECG resultante meramente como notações OWL. Apesar disso, sustentamos que a estrutura de princípios da ontologia (ex. a solidez ontológica de taxonomias parte-de e subordinação) ainda é preservada na implementação.

Integração ontológica

Buscamos a integração ontológica, especialmente com respeito ao OBO foundry e a iniciativa da web

semântica. Esta última nos influenciou para selecionar a combinação OWL DL/SWRL como linguagem de código ontológica. Com relação ao primeiro, a princípio nossa teoria ontológica de ECG se baseia no FMA no que cobre os conceitos anatômicos humanos que são relevantes para uma teoria ECG. Além disso, aplicamos a Ontologia de Funções (OF) proposta em (Burek et al. 2007) como uma estrutura ontológica de nível superior para modelar funções eletrofisiológicas do coração. Em segundo lugar, tomamos emprestadas relações do OBO Ontologia Relacional (domínio cruzado) (Smith et al. 2005), que são especialmente valiosas para definir relações espaciais ao longo do tempo. Nós os usamos em combinação com relações específicas de domínio cunhadas aqui e relações complementares formalmente descritas em UFO.

A Ontologia Relacional OBO

Uma distinção essencial em muitas ontologias fundamentais (ex. DOLCE, OGF, UFO) e, em particular, na Ontologia Relacional (OR) OBO, é a distinção entre *permanentes* e *processos*. Dito literalmente (Smith et al. 2005).

Permanentes são aquelas entidades que persistem, continuam a existir através do tempo passando por diferentes tipos de mudanças, incluindo mudanças espaciais. Processos são entidades que se desdobram em fases temporais sucessivas.

De modo geral, a noção de permanente é semelhante ao que se chama de *resistente* em UFO, enquanto que o processo pode ser entendido como semelhante ao *resistente*. A tabela 1 apresenta as relações OR que empregamos aqui. Uma discussão nessas relações pode ser encontrada em (Smith et al. 2005). Nessa seção, por uma questão de brevidade, mantivemos inicialmente a sintaxe semi-formal empregada nesse artigo para posteriormente partir para seus contrapartes da Lógica de Primeira Ordem (LPO) correspondentes. As seguintes variáveis e faixas são usadas em seguida.

- C, C_1, \dots para faixas em classes permanentes
- P, P_1, \dots para faixas em processos permanentes
- c, c_1, \dots para faixas em instâncias permanentes
- p, p_1, \dots para faixas em instâncias de processo
- r, r_1, \dots para faixas de regiões espaciais em três dimensões
- t, t_1, \dots para variações em instâncias de tempo

Tabela 1 - As relações usadas na Ontologia Relacional OBO

Relação	Definição
c instance_of C at t	Uma relação primitiva entre uma instância permanente e uma classe que instancia e um tempo específico
p instance_of P	uma relação primitiva entre uma instância de processo e uma classe que instancia independente de tempo

Cont.

c part_of c ₁ at t	uma relação primitiva entre duas instâncias permanentes e um tempo em que um é parte do outro
c located_in r at t	Uma relação primitiva entre uma instância permanente, a região espacial que ela ocupa em um tempo específico
r ₁ part_of r ₂	uma relação primitiva parte-de, independente de tempo (ex. constante) entre regiões espaciais (uma sendo sub-região da outra)
r adjacent_to r ₁	uma relação primitiva de proximidade entre duas regiões espaciais disjuntas
t ₁ earlier t ₂	uma relação primitiva entre dois tempos
p has_participant c at t	Uma relação primitiva entre um processo, um permanente em um tempo específico
p has_agent c at t	uma relação primitiva entre um processo, um permanente em um tempo t específico em que o permanente está casualmente ativo no processo
c exists_at t	para algum p, p has_participant c at t
p occurring_at t	para algum c, p p has_participant c at t
t first_instant p	p occurring_at t e para todo t, se t, t anterior então não p occurring_at t
t last_instant p	p occurring_at t e para todo t, se t, t anterior então não p occurring_at t
c located_in c ₁ at t	para algum r, r ₁ (c located_in r at t em t e c ₁ , located_in r ₁ em t e r part-of r ₁)

Resultados

Anatomia para o ECG

Essa sessão fornece um relato ontológico dos permanentes anatômicos do corpo humano diretamente envolvidos no ECG. Tomamos a FMA como referência e depois consideramos os universais permanentes com os mesmos termos empregados pela FMA ou com seus sintomas. Contudo, não seguimos rigidamente as escolhas de modelagem da FMA já que elas não são totalmente apoiadas pelos fundamentos ontológicos. Por exemplo, Donnelly et al. (2005) apontam alguns problemas com relação à concepção de relações parte-todo na FMA, enquanto Kumar et al. (2004, p. 505) e Rector et al. (2006, p. 345) discutem problemas na FMA com relação à granularidade.

Em consonância com a FMA (ver Figura 1 para a taxonomia anatômica parte-de), começamos com o *corpo humano* e elaboramos nas partes que compõem o *coração humano*. Incluímos no nosso modelo *pele*, *superfície da pele* e *região da superfície da pele* porque, para antecipar a seção que lida com o ECG, a última é parte é a parte do corpo humano que é objeto de mensuração por um aparelho de registro para aquisição de ECG. No nosso escopo, vale a pena dizer que o coração tem como partes o *átrio direito* e *esquerdo*, o *ventrículo direito* e o *esquerdo* e a *parede cardíaca*. Enquanto o *átrio* e os *ventrículos* são subtipos

das *cavidades de órgão*, a parede do coração é um subtipo de parede de órgão. A parede do coração tem como partes as camadas do endocárdio, epicárdio e *miocárdio*. A última é um subtipo de *camada muscular de um órgão*, que é ainda dividida (não completamente) em *miocárdio atrial direito* e *esquerdo* e *miocárdio ventricular direito* e *esquerdo*. São todos tipos de *regiões do miocárdio* e têm como partes os sistemas condutores do *átrio direito* e *esquerdo* e dos *ventrículos direito* e *esquerdo* respectivamente.

Consideramos aqui somente o *sistema condutor do átrio direito*, já que ele exemplifica uma divisão completa em variadas partes finais do coração no nosso escopo. Diferente dos curadores de FMA, não incluímos na partonomia anatômica principal universais em diferentes níveis de granularidade (cf. Rector et al. 2006), ex. *miócito do nó SA*. Supomos aqui que tal universal é uma granulação do conjunto de *miócitos do nó SA*. Esse conjunto de *miócitos*, por sua vez, é um componente funcional do (um tipo específico de parte) *nó SA*, que emerge do conjunto de células associadas a um *fluido extracelular*. No nosso entendimento, o grânulo de *miócito do nó SA* não é parte do *nó SA*. A noção de conjunto é contemplada na ontologia UFO (Guizzardi 2005, Capítulo 5) e também é discutida em profundidade em (Rector et al. 2006).

Na partonomia anatômica da Figura 1, usamos a relação de parte-de adotando o que é conhecido em Ontologia Formal como *mereologia mínima* (Guizzardi 2005, Capítulo

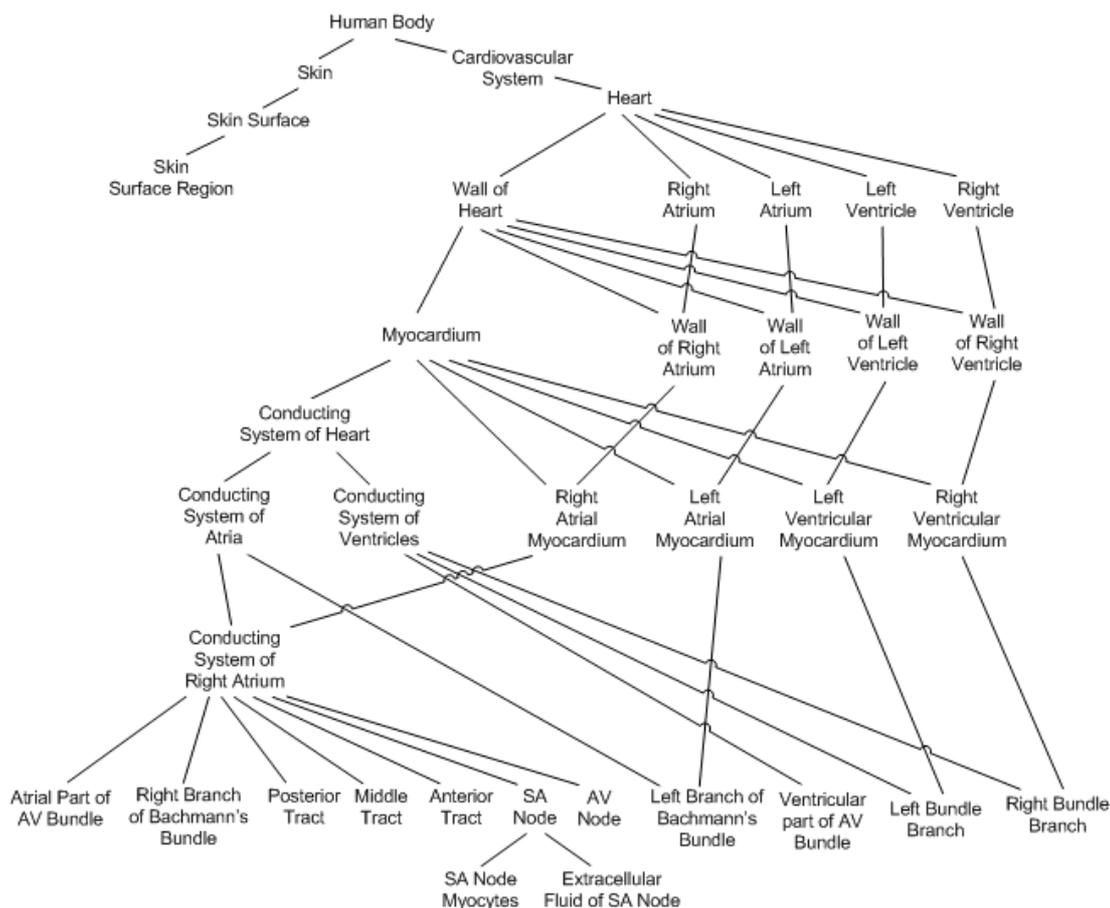


Figura 1 - Partonomia de uma anatomia para o ECG. As linhas representam relações parte-de (de baixo para cima) entre as entidades anatómicas.

5). As ligações parte-de mostradas na Figura 1 representam uma relação de nível universal (entre dois universais, ex. o átrio direito é parte do coração) definido a partir de um nível-instância parte_de (entre dois indivíduos, ex. meu átrio direito é parte do meu coração em particular). A relação de parte de nível universal é definida considerando a versão nível-instância. Esta é uma relação primitiva caracterizada pelas meta-propriedades de irreflexibilidade, assimetria e transitividade. Formalmente, isso significa que:

Irreflexibilidade: $\forall c, t \neg \text{part_of}(c, c, t)$

Assimetria: $\forall c_1, c_2, t \text{part_of}(c_1, c_2, t) \rightarrow \neg \text{part_of}(c_2, c_1, t)$

Transitividade: $\forall c_1, c_2, c_3, t \text{part_of}(c_1, c_2, t) \wedge \text{part_of}(c_2, c_3, t) \rightarrow \text{part_of}(c_1, c_3, t)$

A relação de parte de nível universal (as ligações na Figura 1) pode então ser obtida como a seguir:

$$\text{part_of}(C_1, C_2) =_{\text{def}} \forall c_1 \exists t_1 \text{instance_of}(c_1, C_1, t_1) \rightarrow \forall t (\text{instance_of}(c_1, C_1, t) \rightarrow \exists c_2 (\text{instance_of}(c_2, C_2, t) \wedge \text{part_of}(c_1, c_2, t)))$$

Perceba também na Figura 1 que algumas entidades na partonomia só têm uma parte. Embora isso não seja

problema ao se adotar a mereologia mínima, a razão verdadeira aqui é outra. Essas entidades tem outros universais como partes, mas não são relevantes para a representação de ECG. Finalmente, é importante destacar que usamos a relação parte-de aqui para representar uma relação de parte adequada. Se necessário, uma relação de parte inadequada pode ser definida como de costume:

$$\text{improper_part_of}(c_1, c_2, t) =_{\text{def}} \text{part_of}(c_1, c_2, t) \vee (c_1 = c_2 \text{ at } t)$$

Eletrofisiologia do coração humano

Fontes bioelétricas surgem espontaneamente no coração no nível celular. Os miócitos (células musculares) do coração são imersas em fluido extracelular separados do seu interior por membranas que realizam o controle do transporte de íons. No estado de repouso, o interior desses miócitos tem um potencial negativo com relação ao exterior, ex. as células são eletricamente polarizadas. Entretanto, especialmente nos nós sinoatrial (SA) e atrioventricular (AV), partes do miocárdio (ver Figura 1), os miócitos abruptamente despolarizam e depois voltam para seu valor de repouso. Esse fenômeno é um resultado dos íons passando em qualquer direção através da membrana da célula (Geselowitz 1989).

Portanto, especialmente os miócitos do nó SA e AV originam impulsos elétricos que são propagados para os miócitos vizinhos e normalmente atingem todo o coração. Por isso os nós SA e AV são chamados de marca-passos do coração. Entretanto, como esse tipo de impulso elétrico surge no nó SA em um ritmo mais rápido e com maior intensidade, diz-se que o impulso elétrico do nó AV é forçado pelo impulso no nó SA (Geselowitz 1989). Para conduzir o impulso elétrico cardíaco (surgido no nó SA) por todo o coração, existem outros miócitos além dos miócitos do SA e AV (as fibras de Purkinje) que constituem o *sistema condutor do coração* (ver Figura 2). O principal percurso de condução é o chamado sistema His-Purkinje. Ele é composto do feixe atrioventricular (feixe AV ou feixe de His), então bifurcado nos *ramos de feixe direito e esquerdo* (Laske & Iaizzo 2005, Guyton & Hall 2006). Como resposta ao impulso elétrico cardíaco conduzido pelo sistema, o miocárdio tem contrações em suas partes atrial e ventricular para lançar o sangue respectivamente nos ventrículos e na circulação sistêmica ou pulmonar.

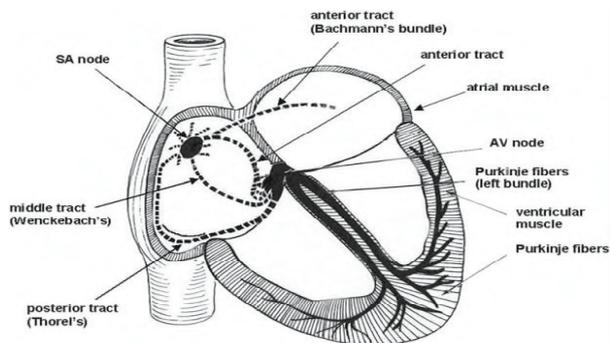


Figura 2 - O sistema de condução do coração (fonte: Laske & Iaizzo 2005).

Dada essa visão geral, agora nos concentramos na representação ontológica da eletrofisiologia do coração humano significativa para a representação do ECG. Para tal, elaboramos com base na Ontologia de Funções (OF) proposta por Burek et al. (2007). Basicamente, buscamos fornecer uma estrutura clara das funções eletrofisiológicas do coração (*o que são*), e *como e por quem* podem ser realizadas. Pretendemos, dessa forma, conseguir reconstruir essas entidades fisiológicas de um ECG específico.

A estrutura básica de uma função, conforme apresentada em (Burek et al. 2007) é um conjunto de rótulos, um item funcional, um conjunto de exigências a serem cumpridas caso a função seja realizável e um objetivo a ser satisfeito no caso da função ser de fato realizada. A função está ligada ao permanente que *tem* a função e que pode *realizá-la* exercendo um *papel* específico (o item funcional). Esse papel é exercitado pelo que é chamado em Filosofia de *qua indivíduo* (Guizzardi 2005, Capítulo 7). Por exemplo, se John casa com Mary, os direitos e deveres (legalmente falando) devem ser desse momento em diante satisfeitos por John-qua-marido-de-Mary. Finalmente, a função é realizada por meio de um processo. Esse processo garante a transição de um estado do mundo (SOW) no qual as exigências da função são satisfeitas, para o SOW no qual o objetivo da função é satisfeita. Esse processo é chamado a *realização* da função. A realização pode ser considerada *real* ou *circunstancial*. Isto é, o processo pode ser a capacidade de realização da função, mesmo se essa capacidade nunca é efetivada, ex. no caso de algum mau funcionamento.

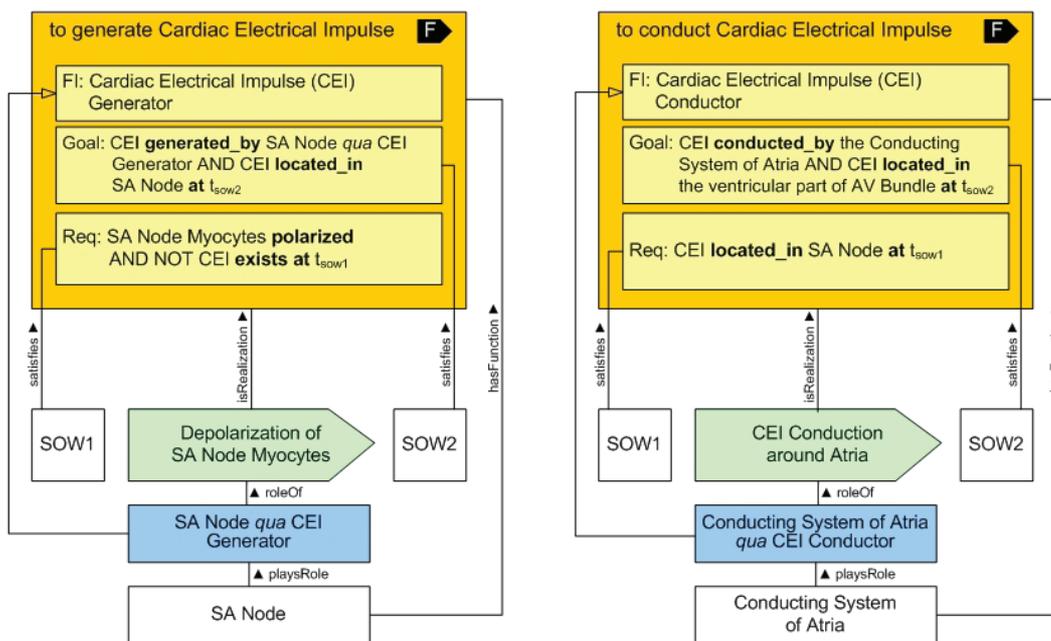


Figura 3 - Funções eletrofisiológicas do coração representadas na estrutura de OF.

A Figura 3 ilustra dois exemplos de funções eletrofisiológicas do coração representadas usando a estrutura de OF, isto é, *para gerar impulso elétrico cardíaco* (IEC) e *para conduzir IEC*. Enquanto que o primeiro é realizado por meio do processo de *despolarização dos miócitos do nó SA*, o último, em sua manifestação atrial, é realizado por meio de um processo de *condução do IEC em torno do átrio*. A função *para conduzir o IEC* é manifestada pelo processo de *condução de IEC em torno dos ventrículos* de forma semelhante. A Figura 4 fornece uma representação adaptada dessas funções (incluindo a manifestação ventricular da condução de IEC). Sua aplicabilidade é esclarecida com mais detalhes na sessão sobre ECG.

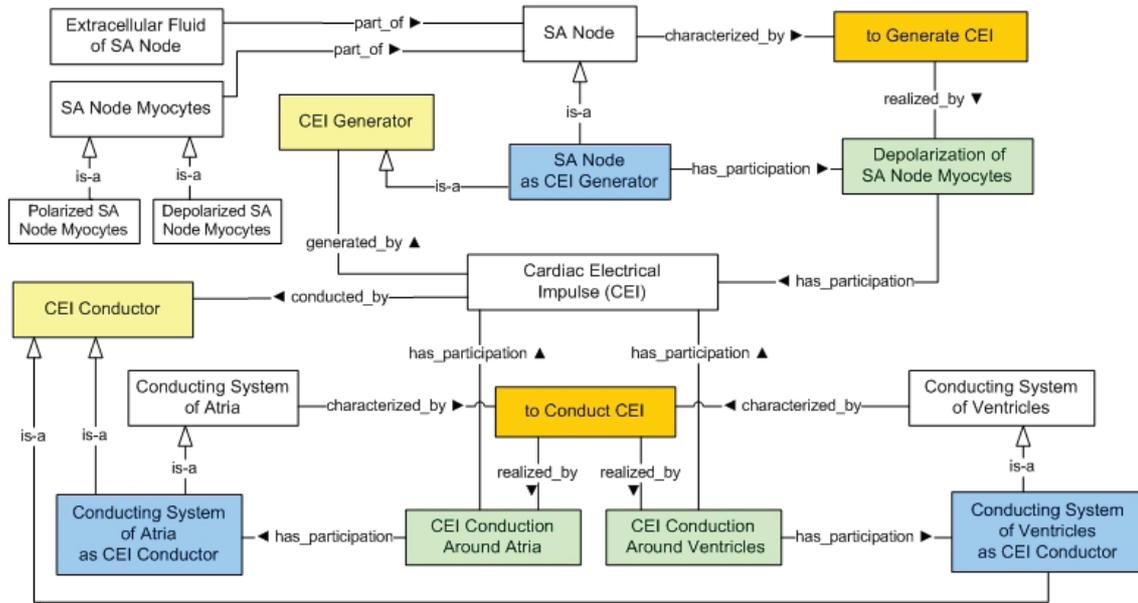


Figura 4 - Parte do modelo eletrofisiológico do coração. A função para *conduzir IEC* caracteriza ambos os sistemas condutores, tanto do átrio como do ventrículo. Essa função pode ser realizada pelo processo de condução do IEC pelo átrio ou pelo ventrículo. A função para gerar IEC em seguida caracteriza o nó SA e pode ser realizada pelo processo de despolarização dos miócitos do nó SA.

Usamos relações específicas definidas a seguir. Primeiramente, antes de definirmos o que significa dizer que o permanente foi *gerado por* outro, precisamos definir a noção de produção. A relação instância-nível produzida_por existe entre um permanente e um processo. Como formalmente descrito abaixo, o permanente c é produzido por um processo p se e somente se existe um e somente um instante de tempo t_1 , tal que t_1 é o último instante de p , p tem c como participante em t_1 e em todos os instantes de tempo anteriores a t_1 , então c não existe em t . A relação universal-nível produzida_por é definida a seguir.

$$\text{produced_by}(c, p) =_{\text{def}} \exists! t_1 (\text{last_instant}(p, t_1) \wedge \text{has_participant}(p, c, t_1) \wedge \forall t (\text{earlier}(t, t_1) \rightarrow \neg \text{exists}(c, t)))$$

$$\text{produced_by}(C, P) =_{\text{def}} \forall c \exists t \text{instance_of}(c, C, t) \rightarrow \exists p \text{instance_of}(p, P) \wedge \text{produced_by}(c, p)$$

Perceba que dizer que um permanente participa em algum processo acarreta que ele existe durante o proces-

so, ver Tabela 1. Agora podemos prosseguir dando uma definição para a noção de geração. Um permanente c é gerado por outro permanente c_1 sse existe um processo p tal que, para todos os instante de tempo t no qual p está ocorrendo então p tem c_1 participando como agente e c é produzido por p . Ver também a versão nível universal.

$$\text{generated_by}(c, c_1) =_{\text{def}} \exists p (\forall t (\text{occurring_at}(p, t) \rightarrow \text{has_agent}(p, c_1, t)) \wedge \text{produced_by}(c, p))$$

$$\text{generated_by}(C, C_1) =_{\text{def}} \forall c \exists t (\text{instance_of}(c, C, t) \rightarrow \exists c_1, t_1 (\text{instance_of}(c_1, C_1, t_1) \wedge \text{generated_by}(c, c_1)))$$

A noção de condução, por sua vez, é um pouco mais complexa. Primeiro, segundo a UFO levamos a categoria *modo* em consideração. A razão é que uma entidade que é objeto de condução, como um impulso elétrico cardíaco (CEI), precisa ser *inerente* a um condutor para existir (Guizzardi 2005, Capítulo 6). Portanto, ela é

existencialmente dependente de algum condutor. O IEC é modelado aqui como um modo, somente como sintoma, que somente existe por ser inerente a um paciente. Antes de fornecer uma definição para condução, apresentamos abaixo a relação primitiva instância-nível de inerência, juntamente com a relação correlata universal-nível de *caracterização*. A inerência é um tipo irreflexível, assimétrico e intransitivo de relação dependente existencial; a caracterização só pode ser aplicada se F (ver fórmula abaixo) é uma instância da categoria *universal momento* (da qual modo é uma especialização). Nesse caso, adicionamos a restrição de que a variável *F* varia sobre funções (um tipo específico de modo).

Irreflexivity: $\forall c, t \neg \text{inheres}(c, c, t)$

Asymmetry: $\forall c, c_1, t \text{ inheres}(c, c_1, t) \rightarrow \neg \text{inheres}(c_1, c, t)$

Intransitivity: $\forall c_1, c_2, c_3, t \text{ inheres}(c_1, c_2, t) \wedge \text{inheres}(c_2, c_3, t) \rightarrow \neg \text{inheres}(c_1, c_3, t)$

Existential Dependency:

$\forall c_1, c_2, \exists t_1 \text{ inheres}(c_1, c_2, t_1) \rightarrow \forall t (\text{exists}(c_1, t) \rightarrow \text{exists}(c_2, t) \wedge \text{inheres}(c_1, c_2, t))$

characterized_by(*C*, *F*) =_{def}

$\forall c \exists t_1 \text{ instance_of}(c, C, t_1) \rightarrow \forall t (\text{instance_of}(c, C, t) \rightarrow \exists f (\text{instance_of}(f, F, t) \wedge \text{inheres}(f, c, t)))$

Podemos então proceder para a descrição formal da relação conduzida por entre dois permanentes *c* e *c_r*. Essa relação é caracterizada aqui usando-se as três fórmulas abaixo. A primeira delas estabelece que se *c* é conduzido por *c_r*, então existe um proceddo (de condução) *p* que ocorre no devido tempo e que, em todos os instantes em que esse processo ocorre, tanto *c* como *c_r* participam desse processo. Ademais, a fórmula estabelece que é inerente a *c_r* durante o esse processo inteiro e somente durante esse processo. Criando essa fórmula com a condição de dependência existencial para a relação de inerência definida acima, temos que participar do processo de condução é uma condição essencial para *c*.

conducted_by(*c*, *c_r*) $\rightarrow \exists p, t_1 \text{ occurring_at}(p, t_1) \wedge \forall t (\text{occurring_at}(p, t) \rightarrow \text{has_participant}(p, c, t) \wedge \text{has_participant}(p, c_r, t) \wedge (\forall t_2 \text{ inheres}(c, c_r, t_2) \leftrightarrow \text{occurring_at}(p, t_2)))$

A próxima fórmula estabelece que em todos os instantes em que *c* é inerente a *c_r* (ex. em todos os instantes em que *c* existe), *c* ocupa uma região espacial *r₁* que é uma parte adequada da região espacial *r* ocupada pelo seu portador (o condutor). Ademais a fórmula estabelece que dado um instante de tempo *t*, só existe uma região ocupada por *c* nesse instante (analogamente para o condutor *c_r*). Finalmente, a fórmula (indiretamente) estabelece que durante o processo de condução *p* (ex. durante a vida de *c*), *c* ocupa todas as partes próprias de *r* mas também que nenhuma parte própria de *r* é ocupada por *c* mais do que uma vez durante o processo *p*.

conducted_by(*c*, *c_r*) $\rightarrow \forall t (\text{inheres}(c, c_r, t) \rightarrow \exists r, r_1 (\text{located_in}(c_r, r, t) \wedge \text{located_in}(c, r_1, t) \wedge \text{part_of}(r_1, r) \wedge \forall r_2, r_3 (\text{located_in}(c_r, r_2, t) \wedge \text{located_in}(c, r_3, t) \rightarrow (r_2 = r) \wedge (r_3 = r_1)) \wedge \forall r_4 (\text{part_of}(r_4, r) \rightarrow \exists! t_1 \text{ inheres}(c, c_r, t_1) \wedge \text{located_in}(c, r_4, t_1))))$

Finalmente, a fórmula a seguir estabelece que dados dois instantes *t₁* e *t₂* tal que *c* é inerente a *c_r* tanto em *t₁* como em *t₂* e que *t₁* é o instante imediatamente anterior a *t₂*, então, em cada desses instantes, *c* ocupa regiões adjacentes.

conducted_by(*c*, *c_r*) $\rightarrow \forall t_1, t_2, r_1, r_2 (\text{inheres}(c, c_r, t_1) \wedge \text{inheres}(c, c_r, t_2) \wedge \text{located_in}(c, r_1, t_1) \wedge \text{located_in}(c, r_2, t_2) \wedge \text{immediately_earlier}(t_1, t_2) \rightarrow \text{adjacent_to}(r_1, r_2))$

Consulte abaixo a relação de *immediately_earlier* (imediatamente anterior) existente entre dois instantes de tempo.

immediately-earlier (*t₁*, *t₂*) =_{def} **earlier**(*t₁*, *t₂*) $\wedge \neg \exists t (\text{earlier}(t, t_2) \wedge \text{earlier}(t_1, t))$

A versão universal-nível da relação **conducted_by** (conduzida por) é a seguinte.

conducted_by(*C*, *C_r*) =_{def}
 $\forall c \exists t \text{ instance_of}(c, C, t) \rightarrow \exists c_r \text{ instance_of}(c_r, C_r, t) \wedge \text{conducted_by}(c, c_r)$

O eletrocardiograma

Uma vez estabelecidas as bases de anatomia e fisiologia, podemos finalmente nos concentrar na nossa análise ontológica no ECG em si. O ECG (em alemão, electrokardiogram, EKG) foi provavelmente o primeiro sinal diagnóstico a ser estudado com o propósito de interpretação automática por programas de computadores (Geselowitz 1989). A razão para tal interesse em registros computacionais de ECG é que a análise do formato de onda do ECG pode ajudar a identificar uma ampla gama de doença cardíacas, que são distintas por modificações nas *formas elementares* de ECG.

Do lado do *paciente*, o ECG é obtido no contexto de uma *sessão de registro/gravação* em que um *aparelho de gravação/registo* é usado para realizar *observações* uniformemente espaçadas no tempo para medir diferenças elétricas potenciais (d.p.) em torno na *superfície da pele* do paciente e com *amostras* produzidas no resultado. Conforme discutido na seção anterior, essas d.p.'s são resultado da atividade elétrica do coração. As observações são feitas ao mesmo tempo a partir de *disposição de eletrodos* em locais diferentes para fornecer pontos de vista múltiplos da atividade do coração (chamados *condutores*). Essas observações correlatas formam *séries de observações* correlatas. Cada série de observação então produz uma *seqüência amostral*.

Agora mudando para a perspectiva do médico, é válido mencionar que os batimentos cardíacos são espe-

lhados em ciclos cardíacos que compõem o formato de onda do ECG. Um ciclo canônico, conforme apresentado por W. Einthoven, tem *ondas* (subtipos de formas elementares) chamadas PQRST. Elas são delineadas como *ondas* P, a soma mereológica de ondas Q, R e S (o chamado complexo QRS), e *onda* T (ver Figura 5). A

onda P e o complexo QRS mapeiam a despolarização dos átrios e ventrículos, respectivamente. As contrações do miocárdio no átrio e ventrículo começam normalmente no pico dessas ondas. A onda T, por sua vez, mapeia a repolarização dos ventrículos⁵ (Geselowitz 1989, Guyton & Hall 2006).

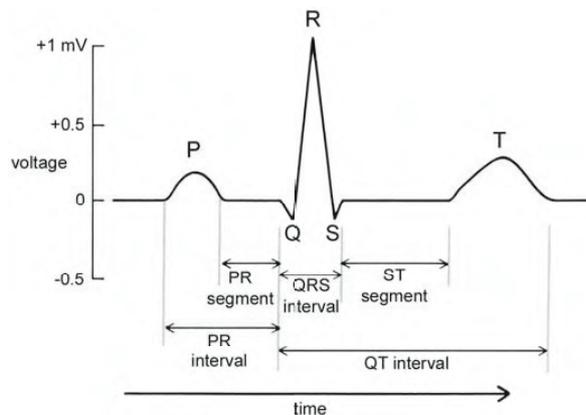


Figura 5 - Um ciclo típico (refletindo um batimento cardíaco) no formato de onda do ECG (fonte: Laske; laizzo 2005). Dois ciclos são conectados pela linha de base, que reflete o estado de repouso do coração.

As Figuras 6 e 7 fornecem representações gráficas do ECG dos lados do paciente e do médico respectivamente. Na nossa ontologia, esses dois modelos são dotados de uma axiomatização LPO correspondente, as quais, por brevidade, são omitidas aqui. Aqui, nessas figuras, os modelos destinam-se exclusivamente à representação

visual do domínio do ECG sem nenhuma intenção de ser completo. Esses modelos são baseados em evidências presentes em livros médicos mas também sintetizam questões presentes em padrões de ECG atuais (deixando de fora aspectos tecnológicos).

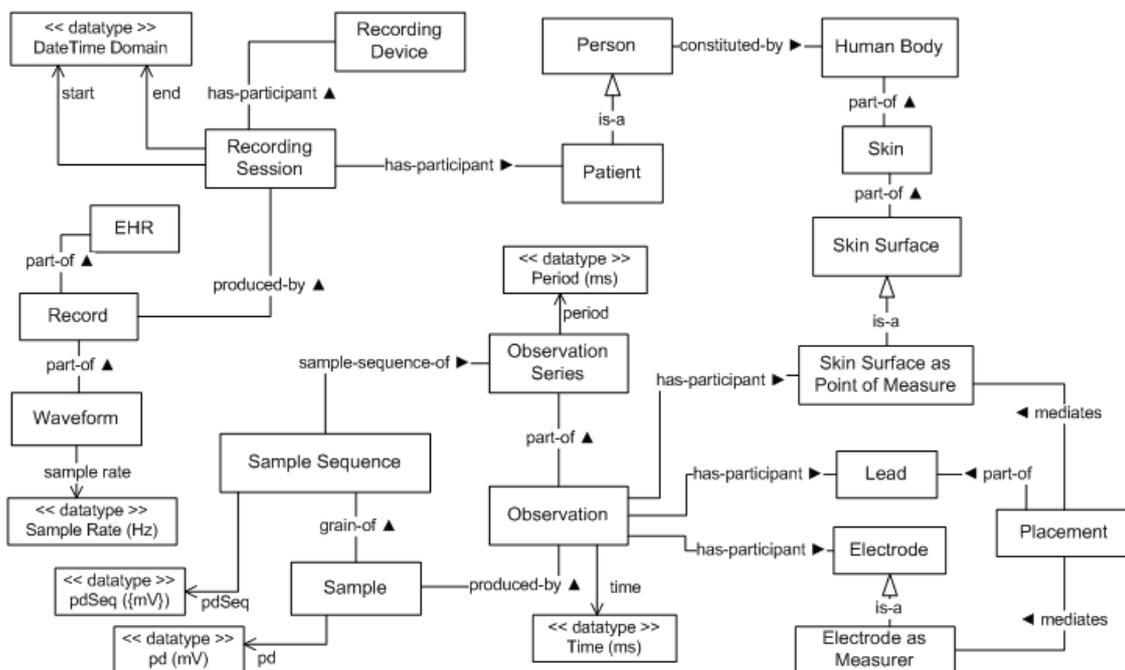


Figura 6 - Modelo de ECG do lado do paciente. Ele ou ela participam de uma sessão de registro destinada a produzir um registro de ECG. Nessa sessão, diversas observações são feitas por eletrodos posicionados na superfície da pele do paciente. Cada observação produz uma amostra, que é um grânulo da seqüência amostral (um conjunto ordenado de amostras). Por uma questão de brevidade, omitimos aqui a representação de diversas configurações de colocação de eletrodos em regiões específicas da superfície da pele que compõem os condutores de ECG (ver I, II, II, aVL, aVR, aVF, V1, ..., V6).

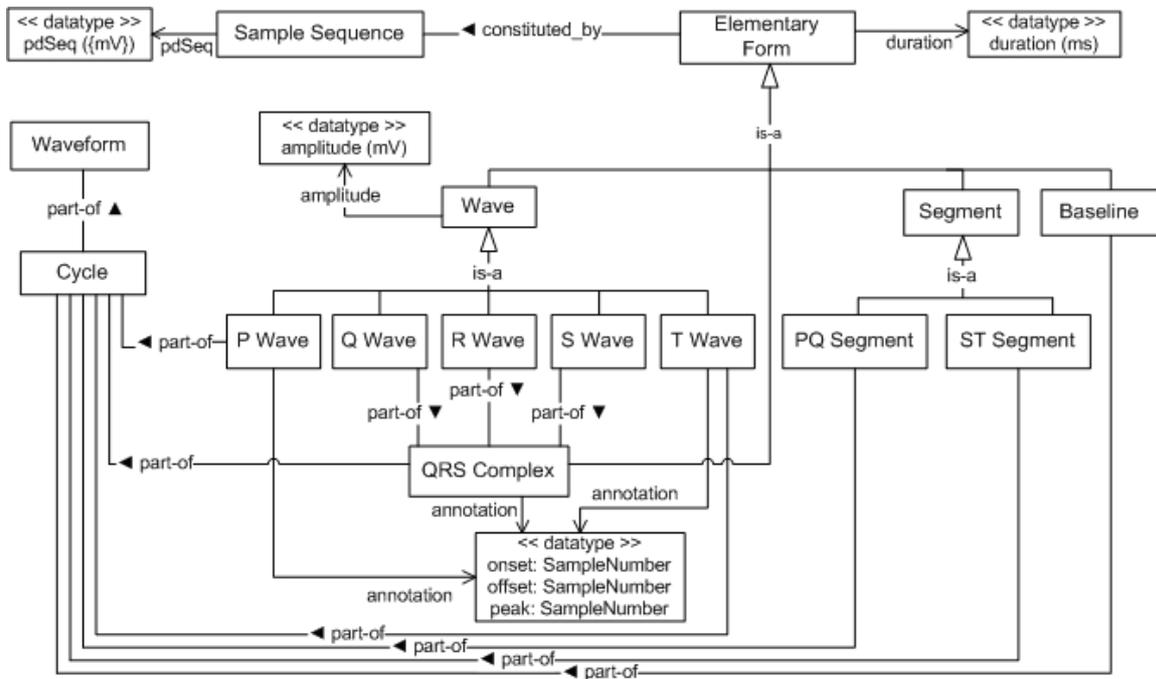


Figura 7 - Modelo de ECG do lado do médico. Ele ou ela pode analisar o formato de onda de ECG, ciclo por ciclo. Cada um representa um batimento cardíaco. O ciclo tem como partes muitas formas elementares diferentes. Uma forma elementar é constituída de uma seqüência amostral, que é um conjunto ordenado de amostras. Observe que esse modelo não cobre nenhuma anormalidade na ECG.

As noções de constituição e mediação usadas nas relações *constituídas por* e *mediadas* são não triviais (Guizzardi 2005). Por uma questão de brevidade, não daremos suas definições neste texto. Uma discussão profunda destas relações pode ser encontrada em (Masolo et al. 2003) e (Guizzardi 2005, Capítulo 6), respectivamente.

Do ECG à eletrofisiologia do coração

Agora temos material para unir os domínios do ECG e da eletrofisiologia do coração. A interpretação de um ECG envolve diversos detalhes sutis que normalmente existem tacitamente na mente do cardiologista. Nosso empenho aqui está em fornecer um método capaz de desvelar explicitamente, a primeira vista, o que um ECG mapeia com relação à eletrofisiologia cardíaca canônica. Portanto, apresentamos a relação chamada *mapas* cujo propósito é associar cada uma das formas elementares de ECG que aparecem no ECG para sua realidade eletrofisiológica subjacente. Pode ser definida nos níveis instância e universal como a seguir.

Primeiro, podemos caracterizar formalmente a relação *observation_series_of* entre um processo de série de observação *o* e um processo (condução) *p*. A fórmula abaixo estabelece que se *o* é uma série de observação do processo *p* então cada observação (atômico) que é parte de *o* é uma observação de uma parte de *p* (e só pode ser uma observação de um processo que é parte de *p*).

$$\text{observation_series_of}(o,p) \rightarrow \forall o_1 (\text{part_of}(o_1,o) \rightarrow \exists p_1 (\text{part_of}(p_1,p) \wedge \text{observation_of}(o_1,p_1)^6) \wedge \forall p_2 (\text{observation_of}(o_1,p_2) \rightarrow \text{part_of}(p_2,p))))$$

Na seqüência, estabelecemos que se temos duas observações o_1 e o_2 que são parte de *o* e que são observações de partes p_1 e p_2 (partes de *p*), respectivamente, tal que o_2 segue o_1 na série *o*, então suas partes de processo observadas respectivas também se seguem da mesma forma (ex., p_2 follows p_1).

$$\text{observation_series_of}(o,p) \rightarrow \forall o_1, o_2, p_1, p_2 (\text{part_of}(o_1,o) \wedge \text{part_of}(p_1,p) \wedge \text{observation_of}(o_1,p_1) \wedge \text{part_of}(o_2,o) \wedge \text{part_of}(p_2,p) \wedge \text{observation_of}(o_2,p_2) \wedge \text{follows}(o_2,o_1) \rightarrow \text{follows}(p_2,p_1))$$

A relação *follows* (segue) existente entre dois processos p_2 e p_1 implica que

$$\text{follows}(p_2, p_1) \rightarrow \exists t_1, t_2 (\text{last_instant}(t_1, p_1) \wedge \text{first_instant}(t_2, p_2) \wedge \text{earlier}(t_1, t_2))$$

Agora, podemos caracterizar a correspondência entre uma série de observação e uma seqüência de amostras representando essa série. As duas primeiras fórmulas são análogas à fórmula apresentada para a série de observações com duas diferenças importantes. Se *s* é uma seqüência amostral da série de observação *o*, então: (i) cada amostra em *s* é produzida por exatamente uma observação em *o*; (ii) existe uma correspondência direta entre observações em *o* e amostras em *s*.

$$\text{sample_sequence_of}(s,o) \rightarrow \forall s_1 (\text{grain_of}(s_1,s) \rightarrow \exists o_1 (\text{part_of}(o_1,o) \wedge \text{produced_by}(s_1,o_1)) \wedge (\forall o_2 \text{ produced_by}(s_1,o_2) \rightarrow (o_1 = o_2)))$$

$$\text{sample_sequence_of}(s,o) \rightarrow \forall s_1, s_2, o_1, o_2 (\text{grain_of}(s_1, s) \wedge \text{produced_by}(s_1, o_1) \wedge \text{grain_of}(s_2, s) \wedge \text{produced_by}(s_2, o_2) \wedge \text{successor_of}(s_2, s_1) \rightarrow \text{directly_follows}(o_2, o_1))$$

A relação *successor_of* (sucessor de) é definida como de costume entre um elemento em uma seqüência e um sucessor (direto) desse elemento naquela seqüência (seguindo o critério ordenador intrínseco dessa seqüência). A relação de *directly_follows* (segue diretamente) é definida como:

$$\text{directly_follows}(p_2, p_1) =_{\text{def}} \text{follows}(p_2, p_1) \wedge \neg \exists p_3 (\text{follows}(p_3, p_1) \wedge \text{follows}(p_2, p_3))$$

Finalmente, podemos definir a relação de *maps* (mapas) entre uma forma elementar *c* e um processo (condutor) *p*:

$$\text{maps}(c,p) =_{\text{def}} \exists s,o \text{ constituted_by}(c,s) \wedge \text{sample_sequence_of}(s,o) \wedge \text{observation_series_of}(o,p)$$

e a relação correspondente em um nível-universal.

$$\text{maps}(C, P) =_{\text{def}} \forall c \exists t \text{ instance_of}(c, C, t) \rightarrow \exists p, t_1 \text{ instance_of}(p, P, t_1) \wedge \text{maps}(c, p)$$

Empregando as noções recém discutidas, damos significado às formas elementares do ECG. Também especificamos um conjunto de regras para reconstruir a partir do formato de onda do ECG os processos eletrofisiológicos correlatos ocorridos sobre permanentes anatômicos. Essas regras fazem uso das nossas representações de função. Como exemplo, considere as regras R1 a R[^] dadas abaixo. Elas dão significado a onda-P baseada na função da direita da Figura 3. Portanto, o que podemos inferir uma vez que tivermos anotado fielmente (portanto, reconhecido) a onda-P?

Primeiramente, cada onda-P *mapeia* um e somente um processo eletrofisiológico da condução do impulso elétrico cardíaco (IEC) em torno do átrio.

$$(R1) \forall c \text{ PWave}(c) \rightarrow \exists p (\text{CEIConductionAroundAtria}(p) \wedge \text{maps}(c, p) \wedge \forall p_1 (\text{maps}(c, p_1) \rightarrow (p_1 = p)))$$

Além disso, todo processo como esse é associado a um e somente um IEC e a um e somente um sistema condutor do átrio desempenhando o papel de condutor de IEC. Efetivamente, eles precisam participar em todo o processo. Formalmente (ver R2),

$$(R2) \forall p (\text{CEIConductionAroundAtria}(p) \rightarrow \exists t_1 (\text{occurring}(p, t_1) \wedge \exists! c_1, c_2 (\text{CEI}(c_1) \wedge \text{ConductingSystemOfAtriaAsCEIConductor}(c_2) \wedge \forall t (\text{occurring}(p, t) \rightarrow \text{has_participant}(p, c_1, t) \wedge \text{has_participant}(p, c_2, t))))))$$

Além disso, para cada processo, existe uma e somente uma função *to conduct CEI* (para conduzir IEC) tal que a última é potencialmente realizada pelo processo. Quer dizer (ver R3), eles são associados um ao outro pela disposição o processo tem que ser a realização da função, mesmo que essa disposição não venha a se tornar real.

$$(R3) \forall p (\text{CEIConductionAroundAtria}(p) \rightarrow \exists! f (\text{toConductCEI}(f) \wedge \text{disp_realized_by}(f, p)))$$

No entanto, se temos o processo, somos capazes de inferir que (ver R4) havia um estado do mundo SOW1 no qual suas exigências foram satisfeitas (ver Figura 3).

$$(R4) \forall p (\text{CEIConductionAroundAtria}(p) \rightarrow \exists! c_1, c_2, t_{\text{SOW1}} (\text{CEI}(c_1) \wedge \text{first_instant}(p, t_{\text{SOW1}}) \wedge \text{SANode}(c_2) \wedge \text{exists}(c_1, t_{\text{SOW1}}) \wedge \text{located_in}(c_1, c_2, t_{\text{SOW1}})))$$

O reconhecimento da realização de *to conduct CEI* (para conduzir IEC) depende da notação, se a onda-P à mão é normal ou não. Isso pode ser formalmente descrito por R5 como se segue.

$$(R5) \forall p, c, f ((\text{CEIConductionAroundAtria}(p) \wedge \text{NormalPWave}(c) \wedge \text{toConductCEI}(f) \wedge \text{maps}(c, p) \wedge \text{disp_realized_by}(f, p)) \rightarrow \text{actual_realized_by}(f, p))$$

Nesse caso, podemos então inferir que os objetivos do *to conduct CEI* foram satisfeitos pelo processo de condução de IEC pelo átrio.

$$(R6) \forall p, f ((\text{CEIConductionAroundAtria}(p) \wedge \text{toConductCEI}(f) \wedge \text{actual_realized_by}(f, p)) \rightarrow \exists c_1, c_2, c_3, t_{\text{SOW2}} (\text{CEI}(c_1) \wedge \text{ConductingSystemOfAtria}(c_2) \wedge \text{VentricularPartOfAVBundle}(c_3) \wedge \text{last_instant}(p, t_{\text{SOW2}}) \wedge \text{conducted_by}(c_1, c_2) \wedge \text{located_in}(c_1, c_3, t_{\text{SOW2}})))$$

Para onde: uma ontologia de ECG

Os resultados do nosso estudo ontológico de Eletrocardiograma foram a fonte do conhecimento de domínio na construção de uma ontologia de ECG. Constitui uma teoria independente de solução de eletrocardiograma, que deve ser reutilizada em diversos aplicativos. Em sua essência, a Ontologia de ECG lida com o que o ECG é tanto do lado do paciente como do médico. Como vimos, isso depende de várias noções relacionadas à eletrofisiologia do coração, que se realiza em entidades anatômicas. O scopo da Ontologia de ECG pode ser definida através das seguintes questões de competência (QC).

QC1. O que compõe essencialmente um registro de ECG?
QC2. Como é obtido o registro de ECG?

- QC3. O que no formato de onda de ECG é objeto da análise do médico para interpretar um comportamento cardíaco correlato?
- QC4. Para todas as formas elementares, que funções eletrofisiológicas do coração elas mapeiam?
- QC5. Para todas as funções eletrofisiológicas cardíacas, que entidades anatômicas são capazes de realizá-las?
- QC6. Para todas as funções eletrofisiológicas cardíacas, que exigências devem ser satisfeitas para possibilitar sua realização?
- QC7. Para todas as funções eletrofisiológicas cardíacas, que objetivos devem ser satisfeitos para concluir sua realização?

A Ontologia de ECG é então composta por duas subontologias extras, a saber, a anatomia para a subontologia de ECG e eletrofisiologia do coração. Também importa a Ontologia Relacional (OR) OBO, ver Figura 8.

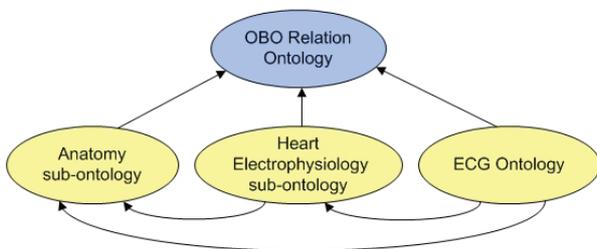


Figura 8 - Importar relacionamentos da Ontologia de ECG. As setas apontam em direção à ontologia sendo importada. A Ontologia Relacional OBO é importada aqui para nos dar relações básicas usadas nas outras.

A Ontologia de ECG foi implementada na linguagem de codificação ontológica OWL DL e sua extensão SWRL. A versão atual da Ontologia de ECG implementada está disponível para download no website do projeto⁷.

Discussão

Competência

As QC's da Ontologia de ECG foi axiomatizada e também implementada em OWL DL/SWRL. Como tal, elas compreendem uma forma de avaliação aproveitando os serviço de raciocínio. Damos dois exemplos abaixo com relação a axiomatização da QC4 e QC7 (mais uma vez tomando a onda-P como exemplo). Elas são respondidas por raciocínio automatizado como demonstrado na Figura 9.

QC4. Para todas as formas elementares, que funções eletrofisiológicas do coração elas mapeiam?

$$\forall c (\text{Pwave}(c) \rightarrow \exists p (\text{ImpulseConductionAroundAtria}(p) \wedge \text{maps}(c, p)))$$

QC7. Para todas as funções eletrofisiológicas cardíacas, que objetivos devem ser satisfeitos para concluir sua realização?

$$\forall f, c, c_1, p, t_{\text{SOW}_2} ((\text{toConductCEI}(f) \wedge \text{ConductingSystemOfAtria}(c))$$

$$\wedge \text{characterized_by}(c, f) \wedge \text{CEIConductionAroundAtria}(p) \wedge \text{actual_realized_by}(f, p) \wedge \text{last_instant}(p, t_{\text{SOW}_2}))$$

$$\rightarrow (\text{CEI}(c_1) \wedge \text{has_participant}(p, c_1, t_{\text{SOW}_2})) \rightarrow (\text{conducted_by}(c_1, c) \wedge \exists c_2, c_3 (\text{VentricularPartOfAVBundle}(c_2) \wedge \text{ConductingSystemOfHeart}(c_3) \wedge \text{part-of}(c, c_3) \wedge \text{part-of}(c_2, c_3) \wedge \text{located_in}(c_1, c_2, t_{\text{SOW}_2}))))$$

Figura 9 - Imagem de um serviço de raciocínio que responde as QC's da Ontologia de ECG usando sua própria implementação OWL DL/SWRL.

Aplicabilidade

Uma ontologia de domínio independente de aplicativo como a Ontologia de ECG pode ser aplicada para muitos fins diferentes. Os exemplos incluem o que será brevemente discutido abaixo: (i) gerenciamento da heterogeneidade da informação e (ii) raciocínio sobre os universais e particulares, semelhante ao que foi referido por Burgun (2006).

Gerenciamento da heterogeneidade da informação

Uma vez que supomos que a Ontologia de ECG é muito importante na representação *do que é ECG* e somente isso (ex., independente de questões tecnológicas), ela pode ser usada para dar suporte ao design de versões interoperáveis de formatos de dados de ECG como SCP-ECG, FDA XML e HL7. Tomando a Ontologia de ECG como referência, as entidades presentes nesses formatos de dados podiam ser semanticamente espelhados nos universais ontológicos, em vez de ser objeto de mapeamentos em pares. Com isso, os formatos de dados de ECG devem estar de acordo com o desiderato CIMINO, a saber: (i) *não incerteza*, as entidades que formam os nodos do formato de dados devem corresponder a pelo menos um universal; e (ii) eles devem corresponder a não mais que um universal, isto é, *não ambigüidade*. Como a axiomatização da Ontologia de ECG permite pouca liberdade tanto para a incerteza quanto para a ambigüidade, essa solução iria pelo menos forçar os formatos de dados para fazer suas suposições explícitas. Além disso, essa proposta é custo-eficiente, já que n formatos de dados exigem n mapeamentos para uma ontologia de referência, enquanto mapeamentos em pares $n(n-1)/2$ seriam exigidos (Burgun 2006).

Raciocínio sobre universais e particulares

A Ontologia de ECG delineada aqui foi integralmente implementada em uma linguagem de codificação ontológica. No nosso projeto, nós usamos o OWL DL e sua extensão SWRL em virtude do instrumento de raciocínio produzido em série disponível, ex. Pellet (Sirin et al. 2007). O arquivo OWL DL/SWRL é então suscetível para ser eficientemente usado para o raciocínio automatizado, embora não mantendo a axiomatização da ontologia (ver a Seção “Métodos”).

A Ontologia ECG representa um modelo canônico da anatomia do coração e um modelo canônico da eletrofisiologia do coração. O modelo ECG, antagonicamente, pode ser preenchido por qualquer instância de registro de ECG real. Entretanto, um complexo QRS deformado (possivelmente indicando alguma patologia) não teria um impulso elétrico cardíaco não canônico para o qual mapear. Dada essa elucidação, vamos lançar luz sobre o que pode ser feito. Usando-se uma instância de um registro⁸ de ECG normal (uma ferramenta de estudo), podemos reconstruir a eletrofisiologia (canônica) por trás. Portanto, de uma instância normal de um complexo QRS (fielmente anotado), somos capazes de reconstruir

o impulso elétrico cardíaco por trás e a anatomia no qual ocorreu.

Uma aplicação característica para isso é um sistema para dar suporte ao aprendizado em eletrofisiologia cardíaca e ECG. De fato, criamos esse sistema que usa uma versão anterior da Ontologia de ECG (ver Gonçalves et al. 2009). Nesse sistema, uma tabela de ECG é criada a partir de um arquivo OWL de ECG (com dados preenchidos para os indivíduos da ontologia). Além disso, uma ilustração do sistema de condução do coração é capaz de mostrar animações em resposta a cliques do usuário tanto neste último como em um ponto da tabela de ECG. Esses cliques pedem um procedimento de raciocínio que enfatiza uma forma elementar no formato de onda de ECG e seleciona o fenômeno de condução correlato a ser animado.

Tudo isso também poderia ser feito com um registro de ECG não canônico se tivéssemos um modelo não canônico de fisiologia para reconstruir. Até onde investigamos, isso parece ser possível estendendo a subontologia da eletrofisiologia do coração para lidar com a imprecisão (incerteza) da realização das funções eletrofisiológicas do coração.

Limitações e trabalhos futuros

Conforme exposto na discussão acima, as limitações dos nossos resultados são em maioria devidas à complexidade em lidar com aspectos fisiológicos do coração humano. Isso é particularmente difícil quando questões fenotípicas devem ser cobertas. Portanto, um forte empenho de pesquisa é demandado para estender a teoria ontológica de ECG apresentada aqui com tal propósito.

Entre as direções enfrentadas para trabalhos futuros nós incluímos: (i) a liberação de uma versão atualizada do sistema baseado em raciocínio da web proposto em (Gonçalves et al. 2009) para colocar em uso online a Ontologia de ECG implementada; (ii) a investigação de como capturar do ECG a imprecisão inerente de se uma função eletrofisiológica do coração foi de fato realizada. Nós acreditamos que este é um ponto de partida importante para lidar com casos patológicos específicos.

Conclusões

Neste artigo, fornecemos um relato ontológico do exame cardiológico ECG e sua correlação com a eletrofisiologia do coração humano. A Ontologia de ECG delineada aqui constitui uma teoria de domínio axiomatizada fundamentada em uma base ontológica de princípios. A aplicabilidade dessa ontologia também foi ilustrada por dois propósitos diferentes, a saber, o gerenciamento da heterogeneidade dos padrões de formato de dados de ECG e raciocínio automatizado. Com este último em mente, traduzimos os modelos e a fórmula LPO que apresentamos aqui em uma linguagem de codificação ontológica OWL DL com sua extensão SWRL.

Como parte de um empenho de pesquisa mundial em andamento para fomentar as representações ontológicas da realidade biomédica, nosso empreendimento é apropriado. Naturalmente, nossa investigação ontológica de ECG pode ser elaborada para aumentar, digamos, o *nível de detalhe* e até mesmo cobrir uma lacuna eventual. Enquanto isso, o desafio da integração da ontologia ainda é difícil mesmo nesse campo de pesquisa cada vez mais firme chamado ontologia biomédica. Entretanto, lutando para manter a conformidade com as iniciativas correlacionadas, nós nos empenhamos nesse sentido. De qualquer maneira, o caso é que “O valor de qualquer tipo de dados [ou ontologia] é muito intensificado quando ele existe de uma forma que permite que seja integrado com outros dados [ou ontologia]” (Smith et al. 2007). Nesse espírito, a Ontologia de ECG pode ser entendida como uma contribuição a ser agregada no empenho ontológico biomédico.

Agradecimentos

Essa pesquisa foi parcialmente apoiada pelos projetos MODELA (financiado pela agência de fomento brasileiro - Facitec) bem como os projetos INFRA-MODELA e software livre e interoperabilidade em saúde (financiado pela agência de financiamento Fapes).

Notas

1. Temos ciência de duas iniciativas de pesquisa em andamento que se encaixam em linhas gerais na eletrofisiologia do coração. Rubin et al. (2006) apresentam uma metodologia simbólica, voltada para a ontologia, para representar um modelo fisiológico da circulação como uma alternativa aos modelos matemáticos comumente empregados. Por sua vez, Cook et al. (2004) estão se empenhando em uma extensão do FMA para cobrir a fisiologia.
2. Protocolo de Comunicação Padrão para Eletrocardiografia auxiliada pelo computador <http://www.openecg.net/>.
3. Especificação de Design do Formato De Dados FDA XML <http://xml.coverpages.org/FDA-EGC-XMLDataFormat-C.pdf>.
4. Mensagem de Notação V3 HL7ECG <http://www.hl7.org/V3AnnECG>.
5. A repolarização do átrio não pode ser vista no formato de onda de ECG já que seus potenciais resultantes são pequenos em amplitude e então excedido pelo complexo QRS. Uma onda U também é frequentemente mencionada, mas sua origem ainda não é completamente conhecida.
6. Aqui supomos que se *observation_of* (o,p) então o processo ocorre sincronicamente ou após o processo p. Intuitivamente, não pode haver observação do futuro.
7. <<http://nemo.inf.ufes.br/biomedicine/ecg.html>>
8. A Physionet (Goldberger 2000), por exemplo, fornece padrões de dados ECG com anotações feitas por outros médicos ou programas de computador. Essas anotações são em geral para marcar e classificar as formas elementares de ECG (ex. a onda-P, o complex QRS e por aí vai).

Referências bibliográficas

- Bittner T, Donnelly M. Logical properties of foundational relations in bio-ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2007; 39(3):197-216. [doi: 10.1016/j.artmed.2006.12.005]
- Burek P. et al. A top-level ontology of functions and its application in the Open Biomedical Ontologies. *Bioinformatics*. 2006; 22(14):e66-e73. [doi: 10.1093/bioinformatics/btl266]
- Burgun A. A desiderata for domain reference ontologies in Biomedicine. *J Biomed Info*. 2006; 39(3):307-13. [doi: 10.1016/j.jbi.2005.09.002]
- Cimino J. Desiderata for controlled medical vocabularies in the twenty-first century. *Meth Info Med*. 1998; 37(4-5): 394-403.
- Cook D et al. Evolution of a Foundational Model of Physiology: Symbolic representation for functional bioinformatics. In: *World Congress on Medical Informatics*, 11th, San Francisco, USA, 2004, Proceedings. IOS Press. 2004:336-40.
- Donnelly M, Bittner T, Rosse C. A formal theory for spatial representation and reasoning in biomedical ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2006; 36(1):1-27. [doi: 10.1016/j.artmed.2005.07.004]
- Geselowitz D. On the Theory of the Electrocardiogram. *Proceedings of the IEEE*. 1989; 77(6):857-76. [doi: 10.1109/5.29327]
- Goldberger A et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation*. 2000;101(23): e215-e220.
- Gonçalves B, Guizzardi G, Pereira Filho JG. An electrocardiogram (ECG) domain ontology. In: *Workshop on Ontologies and Metamodels for Software and Data Engineering*, 2nd, João Pessoa, Brazil, 2007. Proceedings. 2007:68-81.
- Gonçalves B, Zamborlini V, Guizzardi G, Pereira Filho JG. An ontology-based application in heart electrophysiology: Representation, reasoning and visualization on the web. In: *ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2009)*, 24th, Hawaii, USA, 2009. Proceedings. 2009.
- Guarino N, Welty C. Evaluating ontological decisions with OntoClean. *Commun ACM*. 2002; 45(2):61-5. [doi: 10.1145/503124.503150]
- Guizzardi G. Ontological foundations for structural conceptual models. *Telematica Institute Fundamental Research Series*, Vol.15, Universal Press, The Netherlands. 2005. Available at: <<http://purl.org/utwente/50826>>.
- Guizzardi G, Wagner G. Using the Unified Foundational Ontology (UFO) as a foundation for general conceptual modeling languages. In: Poli R, editors, *Theory and Application of Ontologies*, vol. 2, Springer-Verlag: Berlin; 2009.

- Guizzardi G, Halpin T. Ontological foundations for Conceptual Modeling. *J Appl Ontology*. 2008; 3(1-2):1-12. IOS Press. [doi: 10.3233/AO-2008-0049]
- Guyton A, Hall J. Textbook of medical physiology. 11th edition. Elsevier Saunders:Philadelphia; 2006.
- Heller B, Herre H. Ontological categories in GOL. *Axiomathes*. 2004; 14(1):57-76.
- Horrocks I et al. OWL rules: A proposal and prototype implementation. *J Web Semantics*. 2005; 3(1):23-40. [doi: 10.1016/j.websem.2005.05.003]
- Laske T, Iazzo P. The cardiac conduction system. In: Iazzo P, editors. *Handbook of cardiac anatomy, physiology, and devices*. Humana Press: New Jersey; 2005.
- Masolo C. et al. *Ontology Library: WonderWeb Deliverable D18*. 2003. Available at: <www.loa-cnr.it/Papers/D18.pdf>
- Kumar A, Smith B, Novotny D. Biomedical Informatics and granularity. *Comparative and Functional Genomics*. 2004; 5(6-7):501-508. [doi: 10.1002/cfg.429]
- Rector A, Rogers J, Bittner T. Granularity, scale and collectivity: when size does and does not matter. *J Biomed Info*. 2006; 39(3):333-49. [doi: 10.1016/j.jbi.2005.08.010]
- Rosse C, Mejino J. A reference ontology for bioinformatics: The Foundational Model of Anatomy. *J Biomed Info*. 2003; 36(6):478-500. [doi: 10.1016/j.jbi.2003.11.007]
- Rubin D et al. Ontology-based representation of simulation models of physiology. In: *AMIA Annual Symposium*, Washington DC, USA, 2006. Proceedings; 2006. p. 664-68.
- Schulz S, Hahn U. Towards the ontological foundations of symbolic biological theories. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2007; 39(3):237-50. [doi: 10.1016/j.artmed.2006.12.001]
- Schulz S et al. SNOMED reaching its adolescence: Ontologists' and logicians' health check. *Int J Med Info*. 2008. [doi: 10.1016/j.ijmedinf.2008.06.004]
- Sirin E et al. Pellet: a practical OWL-DL reasoner. *J Web Semantics*. 2007; 5(2):51-3. [doi: 10.1016/j.websem.2007.03.004]
- Smith B. From concepts to clinical reality: An essay on the benchmarking of biomedical terminologies. *J Biomed Info*. 2006; 39(3):288-98. [doi: 10.1016/j.jbi.2005.09.005]
- Smith B et al. Relations in biomedical ontologies. *Gen Biol*. 2005; 6(5):R46. [doi: 10.1186/gb-2005-6-5-r46]
- Smith B et al. The OBO foundry: Coordinated evolution of ontologies to support biomedical data integration. *Nature Biotechnol*. 2007; 25(11):1251-5. [doi: 10.1038/nbt1346]
- Yu A. Methods in biomedical ontology. *J Biomed Info*. 2006; 39(3):252-66. [doi: 10.1016/j.jbi.2005.11.006]
- Zamborlini V, Gonçalves B, Guizzardi G. Codification and application of a well-founded heart-ECG ontology. In: *Workshop on Ontologies and Metamodels for Software and Data Engineering*, 3rd, Campinas, Brazil, 2008. Proceedings. 2008. 

Sobre os autores

Bernardo Gonçalves

Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em 2006. Atualmente, é estudante de mestrado em Ciência da Computação na mesma universidade sob supervisão de Giancarlo Guizzardi. Ele trabalha com a aplicação da Ontologia Formal à Biomedicina. Seus interesses científicos incluem a Ontologia Formal, Lógica Aplicada IA Simbólica e Modelagem Conceitual.

Veruska Zamborlini

Bacharel em Ciência da Computação na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Atualmente, é estudante de mestrado em Ciência da Computação na mesma universidade sob supervisão de Giancarlo Guizzardi. Seus interesses científicos incluem questões de Lógica, Modelagem Conceitual e Ontologia Formal.