

Processador Cognitivo

Carlos Wagner Dias
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação - FEEC - Unicamp
dias.cw@gmail.com

Resumo - Processador cognitivo não é somente simular o cérebro humano, é construir um sistema com capacidade de aprendizagem com a interação com ambiente, usando as mesmas funções do conhecimento do funcionamento do cérebro humano. Essa geração de processadores experimentais projetados para emular as capacidades do cérebro de sensação, percepção, ação, cognição e interação. Com isso, os sistemas estão se tornando mais inteligentes em um ritmo muito acelerado, melhorando a si mesmo em seu ciclo de vida.

Palavras Chaves – memristores, processador neuromórfico, spikes, multithreaded, corelets, neuro-sináptico, processador TrueNorth, Synapse, sistema cognitivo, cérebro.

I. INTRODUÇÃO

O cérebro dos animais (que inclui o cérebro), é de longe o computador mais eficiente já conhecido. Como você pode ver no gráfico abaixo da figura 1, o cérebro humano tem uma velocidade de funcionamento medido em dezenas de hertz, e um consumo total de energia de cerca de 20 watts.

Um chip de silício tradicional, apesar de ter características que estão quase na mesma escala minúscula como neurônios biológicos e sinapses, podem consumir milhares ou milhões de vezes mais energia para realizar a mesma tarefa que um cérebro humano.

À medida que avançamos em direção a áreas mais avançadas de computação, tais como inteligência artificial e análise de “Big Data” - áreas que algumas empresas estão profundamente envolvidas - seria realmente de muita ajuda se tivéssemos um chip de silício que fosse capaz da eficiência do cérebro. [5]

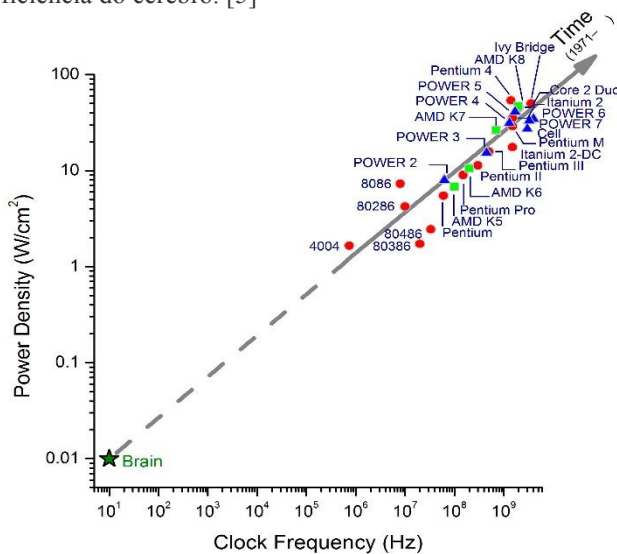


Figura 1 - Cérebro x Processadores - Energia x Frequência

Os computadores cognitivos não terão que ser programados para funcionar como os processadores tradicionais. Em vez disso, a ideia é que eles aprendam com o uso, ou seja, auto aprendizado durante o processamento, encontrando correlações, criando hipóteses, lembrando das experiências passadas e aprendendo com os resultados.

Apesar de se chamar “processador cognitivo”, não há nenhum componente biológico incluído no projeto de processador: todos os “neurônios” e “sinapses” são emulações em silício, usando uma combinação de circuitos semicondutores e algoritmos de software incorporados no processador, chamado de “firmware”. [8] Os nomes das partes são inspirados pela neurociência do novo chip de núcleo neuro-sináptico, que contém a memória (a réplica das sinapses), os circuitos de cálculo (a réplica dos neurônios) e a comunicação (a réplica dos axônios).

Iniciativas como desses projetos são necessários porque a arquitetura de computador tradicional e processadores simplesmente não suportam adequadamente o processamento paralelo com escalabilidade suficientemente e com eficiência para grandes quantidades de dados.

Ainda assim, as diferenças entre a arquitetura Von Neumann atual e a nova arquitetura cognitiva são grandes, a começar pela integração da memória e processador, a parte responsável pelos cálculos em um único chip, que evita o consumo excessivo de energia devido a troca de informações entre o processador e memória e outra grande diferença é que um chip cognitivo não possui um conjunto de instruções que possam ser programadas, já que ele foi projetado para aprender, mas a diferença mais marcante, contudo, é que um processador cognitivo terá, de forma nativa, o processamento paralelo e distribuído com múltiplas entradas permitidas pelos neurônios e suas sinapses que serão orientados por eventos, não funcionando 100% do tempo como os tradicionais e também não segue uma sequência rígida de instruções.

II. PROCESSADOR NEUROMÓRFICO

Processador neuromórfico não roda programas, imita comportamentos. [8]

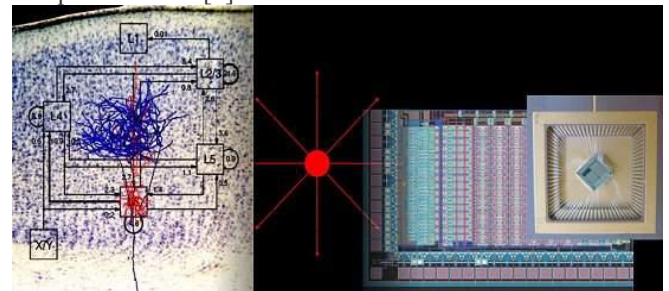


Figura 2 - Simulação

O chip neuromórfico é um sistema de processamento sensorial artificial que apresenta capacidades cognitivas.

Trocando em miúdos, é fazer com que esse chip concebido por neurônios artificiais tenha um comportamento, em vez de executar um programa sequencias, como fazem os processadores eletrônicos tradicionais.

Os processadores neuromórficos são construídos não com transistores comuns, mas com componentes eletrônicos chamados "memristores", que funcionam de forma parecida com os neurônios. [8]

Neuroinformática

Alguns especialistas em neuroinformática foi construído um chip neuromórfico, um sistema de processamento sensorial artificial, que apresentou capacidades cognitivas.

Hoje existe muitas pesquisas em neuroinformática se concentrando na criação de redes neurais artificiais, programas que rodam em computadores tradicionais.

Grupos de cientistas trabalham duro no desenvolvimento de circuitos que possam se comparar a um cérebro, em termos de tamanho, velocidade e consumo de energia com objetivo de emular as propriedades dos neurônios biológicos e das sinapses diretamente nos chips.

O primeiro protótipo fruto desse trabalho é um chip neuromórfico que executa tarefas sensoriais-motoras em tempo real, tarefas que exigem simultaneamente uma memória de curto prazo e um processo de tomada de decisão dependente do contexto.

As redes construídas com neurônios artificiais assemelham-se a estruturas encontradas no cérebro de mamíferos. [8]

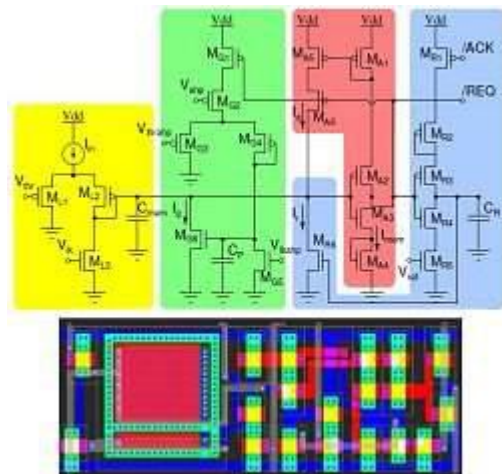


Figura 3 - Esquema físico

Máquinas de estado finito

Chip que faz processamento equivalentes às chamadas "máquinas de estado finito", um conceito matemático para descrever programas de computador ou processos lógicos.

Os comportamentos dos seres vivos podem ser criados de forma simples em termos de máquinas de estado finito, o que permite transcrever para o hardware neuromórfico.

Esse chip tem padrões de conectividade da rede que assemelham-se muito com o cérebro de mamíferos.

Chips neuromórficos poderão ser configurados para uma grande quantidade de classes de comportamento, combinando os chips com componentes sensoriais neuromórficos, tais como uma cóclea ou uma retina artificial, criando assim sistemas cognitivos capazes de interação com o ambiente instantaneamente, dispositivos para vários equipamentos inteligentes, incluindo robôs e

novas gerações de equipamentos inteligentes em nanotecnologia, área em grande desenvolvimento atualmente.

III. PROJETO SYNAPSE

Projeto Synapse (Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics), ou sinapse, projeto, um multimilionário, de muito anos esforço financiado pelos Estados Unidos Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA).

Sinapse foi lançado em 2008 com a participação de IBM Research; HP; e HRL Laboratories, braço de pesquisa da Hughes Aircraft. [6]

O projeto tem como objetivo criar um sistema de hardware e software capaz de analisar informações em paralelamente e reconfigurar-se dinamicamente durante a execução, aprendendo com a própria tarefa realizada. Os Engenheiros neuromórficos das empresas estão conduzindo pesquisas semelhantes na Europa, e uma iniciativa Norte Americana apoiada pelo presidente daquele país, projeto chamado de iniciativa cerebral.

O principal objetivo do projeto Synapse é pegar as funcionalidades do cérebro que são simulados e aplicar esse conhecimento no cérebro em software, como redes neurais e executá-los em um hardware que foi projetado para essa finalidade. A de se saber que hardware dedicado tende a ser mais eficientes do que simular / emular o hardware em software em um processador de propósito geral, tecnologia tradicional assim dizendo. A IBM divulgou algumas funcionalidades absolutamente incríveis para TrueNorth.

Com grande quantidade de Spike e um número razoável de sinapses ativas, TrueNorth executa 400 bilhões de operações/segundo sinápticas (SOPS) para cada watt.

Executando exatamente as mesmas coisas, uma CPU de propósito geral é 176 mil vezes menos energia eficiente, enquanto que um multiprocessador sistema neuromórfico (48 chips, cada um com 18 núcleos) é 769 vezes menos eficiente. Enquanto não é diretamente comparável, supercomputador mais eficiente do mundo só administra cerca de 4,5 bilhões FLOPS por watt. [5]

Sem dúvida uns dos projetos que está dando um grande passo na área da computação cognitiva e com grandes desafios ainda pela frente. Esse projeto consiste nas fases descrito abaixo. Composto de cinco fases (da Fase 0 à Fase 4), Fase 2 do projeto Synapse, integra todo o sistema cognitivo em um único chip, simulando em computadores tradicionais o funcionamento de um processador cognitivo com 10 milhões de neurônios, Fase 3 consisti na fabricação e teste do processador cognitivo de 106 neurônios e o projeto e simulação de um protótipo com 108 neurônios e Finalmente, a Fase 4 tentará construir um processador cognitivo com 108 neurônios, pronto para ser incorporado em um robô capaz de aprender.

Processadores neuro-sinápticos

Dois protótipos dos novos "processadores neuro-sinápticos" foram apresentados trabalhando de forma totalmente diferente da arquitetura dos processadores tradicionais, conhecida como arquitetura Von Neumann.

Ambos os protótipos possuem 256 "neurônios". Um deles contém 262.144 sinapses programáveis e o outro possui 65.536 sinapses reconfiguráveis.

Nesse momento a IBM e sua equipe de engenheiros lança o "morphing chip", um processador com capacidade de se auto reconfigurar.

Ambos os processadores foram testados em aplicações simples voltados à navegação, visão de máquina, reconhecimento de padrões, memória associativa e classificação de dados. [8]



Figura 4 - Simulações reconhecimento de imagens

IV. PROCESSADOR TRUENORTH

Até o momento Cientistas da IBM Research criaram, de longe, o chip neuromórfico mais avançado até o momento. Esse chip TrueNorth, consiste de 1 milhão de neurônios programáveis e 256 milhões de sinapses programáveis em todo 4096 núcleos neurosynaptic individuais. Construído no processo de 28nm da Samsung e com uma contagem de transistor monstruosa de 5,4 bilhões em 4,3 centímetro quadrado, este é um dos maiores e mais avançados chips de computador já feitos. Talvez o mais importante, no entanto, TrueNorth é incrivelmente eficiente. [5]

Focado em performance, este modelo tende a ser enorme, pois segundo os pesquisadores, o principal problema da arquitetura atual é a divisão clássica de memória e cpu, no qual o acesso em série obriga o processador a enviar e buscar informações na memória constantemente, criando assim gargalos no desempenho e exigindo muito mais energia.

Como são construídos em tamanho de nano tecnologia, portanto são pequenos, consumindo pouca eletricidade, chips "tipo cérebro" podendo num futuro próximo projetos como dispositivos vestíveis finalmente deslançarem. Os sensores podem atuar como pequenos processadores, abrindo uma possibilidade gigantesca para estes novos produtos.

Cada núcleo integra memória, computação e comunicação, operando de uma forma orientada a eventos paralelos e tolerância a falhas. Mesmo assim o dispositivo consome apenas 72mW em seu pico máxima de consumo durante a execução de algumas funções como a de reconhecimento e classificação de objetos, equivalendo em torno de 400 bilhões de operações por segundo sinápticas para cada watt, ou seja, 176 mil vezes mais eficiente do que um processador atual que executa a mesma coisa, ou 769

vezes mais eficiente do que outras funções neuromórficos.

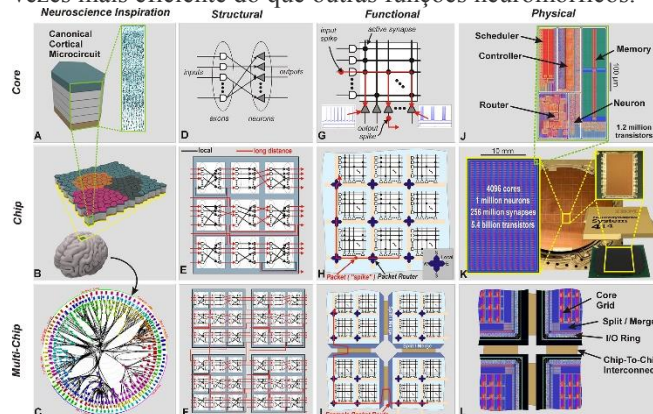


Figura 5 – Detalhes TrueNorth

TrueNorth, é de longe o projeto de maior sucesso nesses 6 anos do projeto Synapse com parceria da IBM Research.

O trabalho, que foi parcialmente financiado pela órgão de defesa americana "DARPA" desde 2008, gerou um resultado de um protótipo do chip com apenas 256 neurônios em 2011, e ao mesmo tempo era desenvolvido a linguagem de programação chamada corelet em 2013. TrueNorth é uma versão mais moderna desse segundo protótipo de 2011, com base na tecnologia de um novo processador (Samsung 28nm vs. IBM 45nm) com uma maior complexidade e poder funcional e eficaz. TrueNorth foi implementado em transistores CMOS, assim como qualquer CPU existente atualmente nos PC mais modernos a única coisa semelhante com os processadores tradicionais.

Cada chip TrueNorth consiste de 4.096 núcleos neurosynaptic organizados em uma grade de 64×64 . Cada núcleo é auto-suficiente, com 256 entradas (axônios), 256 saídas (neurônios), um grande banco de SRAM (que armazena os dados para cada neurônio) e um roteador que permite a qualquer neurônio para transmitir a qualquer axônio até 255 núcleos de distância. O bloco de construção básico é um núcleo independente que implementa 256 neurônios conectados por 256 por 256 pontos matriz transversal de conexões sinápticas. Sistemas mais complexos são feitos por comunicações entre núcleos e off-chip. Cada neurônio em cada núcleo pode direcionar um axônio em qualquer outro núcleo. O sistema é digital com um sinal de sincronização 1-kHz global com núcleos operando em paralelo e orientada a eventos. A comunicação é efetuada por meio de sinais de pico. [9]

Unprecedented scale

This second generation chip is the culmination of almost a decade of research and development, and is a huge leap forward from the initial single-core hardware prototype developed in 2011.

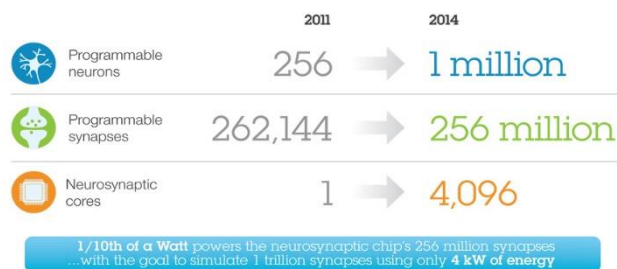


Figura 6 - Evolução TrueNorth

A informação flui através do processador por meio de spikes, de axônios para os neurônios, moduladas pelas sinapses que foram programados entre eles. Arquitetura é baseada no trabalho de Cornell tecnologia em design de

circuito assíncrono e que a IBM só vem aperfeiçoando ao longo dos anos desde 2008.

Com 256×256 (65.536) sinapses configuráveis por núcleo dispostos em uma matriz de barra, e uma rede de malha 2D proporcionando a interconectividade entre os núcleos de 4096, nós provavelmente estamos falando sobre o chip mais massivamente paralelo já feito - o que é justo, considerando-se o paralelismo é um dos cérebros razões animais ser tão eficazes. IBM já construiu um sistema de 16-chip com 16 milhões de neurônios e 4 bilhões de sinapses. [5]

Se você está procurando mais detalhes sobre TrueNorth, um trabalho de pesquisa IBM / Cornell Tech foi publicado na revista Science - DOI: 10.1126 / science.1254642 - "Um milhão de spiking-neurônio circuito integrado com uma rede de comunicação escalável e interface". Este projeto de pesquisa da IBM introduz um novo paradigma de programação (ou seja, um estilo fundamental de programação de computadores; uma maneira de construir a estrutura e elementos de programas de computador), que inclui, entre outros elementos, um simulador de arquitetura e uma biblioteca de software desenvolvido para sinapse. [5]

Cientistas da IBM desenvolveram avanços significativos para que a nova arquitetura fosse criada, com um processamento paralelo altamente escalável simulando o software multithreaded, e seu funcionamento de uma arquitetura de computação cognitiva que consiste em um conjunto de núcleos neurosynaptic.

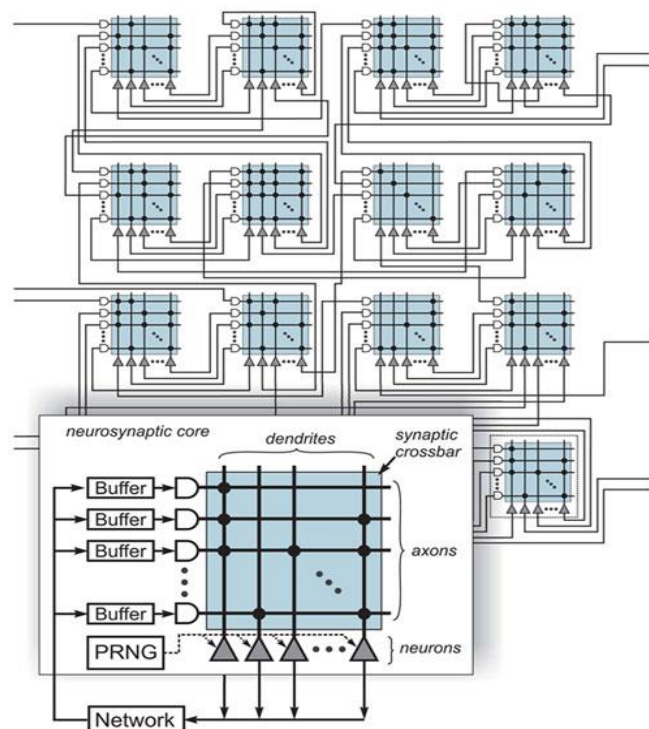


Figura 7 - Cores

Esse novo chip, fruto de parcerias e do projeto synapse de computação cognitiva, não é um produto comercializável e muito menos aplicado e algum projeto de fato real, mas é poderoso o suficiente para lidar com problemas do mundo.

Fase desse projeto atualmente sendo desempenhado pela equipe de cientistas da IBM é de experimentar a conexão entre vários chips sinápticos juntos, e esperam construir um supercomputador usando milhares deles com grande escala.

Funcionamento

Quando o processador alimentado com dados, estes geram um fluxo de picos elétricos e por sua vez os neurônios reagem com uma tempestade de outros picos elétricos. Inspirado no cérebro biológico, pouco mais de um milhão de neurônios no chip são organizados em 4.096 blocos idênticos de 250 que são construídos a partir de circuitos repetidos de 100 a 250 neurônios.

A programação do chip é pura e simplesmente a escolha de quais neurônios serão conectados, e o quanto de influência que um exerce sobre o outro. Para reconhecimento de imagens, o programador trabalharia em configurações necessárias em uma versão simulada do chip, e depois somente assim seriam transferidas as configurações para simular a versão real.

Nos últimos anos na área de processamento de imagens e sons a maior parte dos avanços se deu graças as redes neurais, no entanto, essas redes exigem uma grande quantidade de computadores convencionais para funcionar.

Reconhecimento de Padrões

MIT Technology Review presenciou o chip em funcionamento, onde este foi capaz de reconhecer um carro, pessoas e bicicletas em um vídeo de um cruzamento de estrada. Um laptop, que utilizava um processador convencional, foi programado para executar a mesma tarefa e processou as imagens em um tempo 100 vezes maior do que o tempo real, além de consumir 100 mil vezes mais energia do que o processador cognitivo. [2]

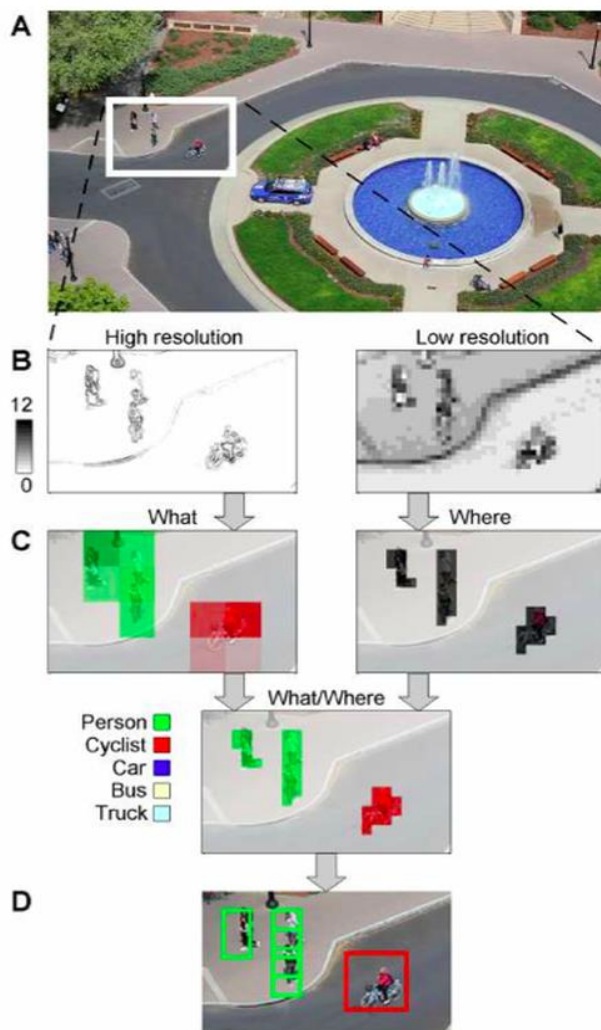


Figura 8 - Reconhecimento de imagens

Embora o SyNAPSE tenha mais transistores do que a maioria dos processadores de desktop, ou de qualquer outro chip que a IBM tenha feito, com pouco mais de cinco de bilhões de transistores, consumiu apenas 63 miliwatts de potência ao executar a demo do vídeo de reconhecimento de tráfego. Processadores para servidores com um número semelhante de transistores consomem dezenas de watts de potência, cerca de 10.000 vezes mais. [2]

Os processadores atuais são limitados, porque eles armazenam dados e instruções de programas em um bloco de memória que é separado do processador, que é quem executa tais instruções. Devido ao seu designer de como trabalha o processador executa essas instruções em uma forma sequencial e linear, precisando de mais energia para transportar a informação tanto da memória para CPU e vice-versa, o que acaba atrasando as coisas o processamento do resultado.

No caso do TrueNorth, esse processo é otimizado, pois memória e a CPU estão em um único bloco, neurônios e sinapses entrelaçam as duas funções, e ainda não trabalhando com esses dados em uma sequência linear de operações, uma vez que os neurônios individuais somente iniciam quando recebem energia de outros neurônios, substituindo a idéia do processador de Von Neumann que processadores ficarem ligados o tempo todo consumindo energia mesmo não sendo utilizados. Especialistas em supercomputação, diz que até agora a indústria se concentrou em trabalhar com a abordagem de Von Neumann ao invés de substituí-la, alguns exemplos como o uso de vários processadores em paralelo, ou o uso de processadores gráficos para acelerar certos tipos de cálculos.

Processadores cognitivos extremamente lentos para algumas tarefas executadas pelos processadores tradicionais. Saida para isso seria uma arquitetura que se complementam, "Inteligência Computacional Holística". [1]



Figura 10 – Inteligência Holística

V. CORELETS

Os corelets são blocos de construção reutilizáveis que funcionam como caixas-pretas, com os seus trabalhos internos escondidos dos programadores. Eles podem ser combinados para produzir maiores corelets, mais complexas. Esses recursos serão familiares aos usuários de programação orientada a objetos. [6]

Cada corelet representa um modelo completo de uma rede de núcleos neurosynaptic que especifica uma função de nível base. Pense neles como moléculas de DNA. Haverá 256 destes corelets em cada núcleo do computador neurosynaptic simulado. [6]

IBM também desenvolveu um programa de ensino que abrange todos os aspectos da TrueNorth. Este inclui um ambiente de end-to-end do software que pode ser usado para criar corelets, acessar a biblioteca, e experimentar com software no simulador, entre outras coisas.

Apesar de serem processadores com capacidade de aprendizagem, logo perceberam a complexidade de instruí-los, pois esses são diferentes dos processadores tradicionais e os programas não eram nem um pouco intuitivos e extremamente difíceis de mapear problemas. Em dois anos

de trabalho intenso esqueceu-se a forma tradicional de programação e desenvolvendo uma nova maneira de desenvolvimento. Devido ser paralelos, os processadores cognitivos precisavam primeiramente aprender como coordenar seus vários blocos para que eles operassem em conjunto com resultados, depois dessa fase bastando criar blocos com as funcionalidades desejadas.

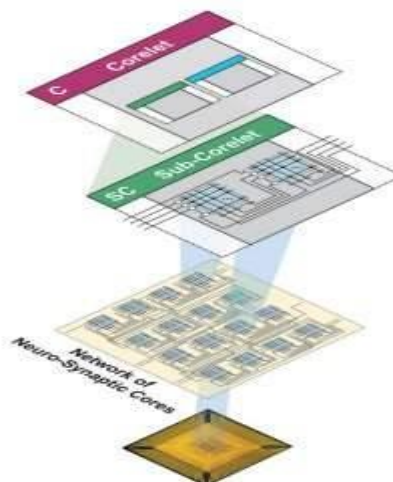


Figura 9 - Corelet

Processamento distribuído

Os sistemas de computadores atuais são construídos sobre o que é conhecido como "arquitetura Von Neumann, mas no processador TrueNorth processa a informação de uma forma distribuídas e paralela, como os neurônios e sinapses de um cérebro biológico. Simulação do funcionamento de uma enorme rede de núcleos neurosynaptic com 100 trilhões de sinapses e 2 bilhões de núcleos neurosynaptic. Para trabalhar com esta abordagem, uma orientada a objetos corelet, linguagem foi projetada para criar, compor e decompor o que são chamados de "corelets - redes neurais minúsculas. Por exemplo, um corelet pode detectar o movimento, enquanto a outra pode ordenar as imagens por cor. Corelets individuais podem ser ligadas em estruturas cada vez mais complexas. A IBM desenvolveu uma biblioteca de 150 corelets pré-concebidos para ajudar os programadores.

A programação é feita off-chip e é um trabalho não trivial que foi divulgado em 2013. Incluiu o desenvolvimento de uma linguagem de programação e um simulador chamado Compass. [9]

VI. DESVANTAGENS

Uma desvantagem desta nova tecnologia está no fato de que esta requer uma abordagem de programação completamente nova. Fazer com que desenvolvedores do mundo adote um novo tipo de arquitetura de processadores e também uma nova forma de codificá-los seria muito audácia, entretanto, pode ser que haja receptividade já que os computadores atuais estão com seu modelo esgotado e que não serão capazes de oferecer muito mais em termos de performance.

Infelizmente, isso não se traduzirá em uma velocidade maior de processamento "em geral": chips cognitivos deverão ser mais rápidos para algumas tarefas, mas incrivelmente lentos para outras. [8]

VII. CONCLUSÃO

Quando coloquei a proposta dessa monografia, sabia que seria uma tarefa árdua, pois hoje ainda não se fala em processadores cognitivos e muito menos estão sendo comercializados, pois o que existe são projetos em estágios avançados e que em 2 anos no máximo já teremos exemplos de funcionamento prático desses processadores atuando nos mais diversos meios que ajudará a prever catástrofes naturais, robôs espaciais, robôs com acesso onde o humano não chega e até mesmo auxiliando no dia a dia das pessoas como “health care” de idosos.

As expectativas são grandes quando falamos de sistemas cognitivos, mais ou menos complexo, pois uma área promissora que no futuro próximo eles possam substituir os reflexos humanos em carros sem motorista e robótica cognitiva por exemplo.

Por ser uma tecnologia nano, poderiam estar sendo projetados carros, smartphones e outras diversas tecnologias vestíveis com esse processador, ajudando no dia a dia, direcionando as pessoas para outras funções que exigiria mais das mesmas.

Ao contrário dos processadores modernos, os processadores cognitivos foram criados para compreender o

ambiente, lidar com ambiguidades e tomar ações em tempo real compatíveis com o contexto. A proposta seria também criar um dos chips mais eficientes em consumo da energia da história, já que não seriam mais necessários tantos cálculos pesados para realizar uma ação [10]

Esses chips poderiam utilizar muito menos processamento poupando energia. Exemplo de robô como que processa imagem e um grande poder computacional para entender que está andando na direção de uma pilastra e desviar antes de colidir. Ajudar as pessoas cegas andarem tranquilamente.

O destaque dessa arquitetura é ajudar a superar a arquitetura de Von Neumann, usada em basicamente todos os computadores desde 1948, que é basicamente um sistema de processamento matemático, com capacidade de perceber e pensar de forma autônoma semelhante aos humanos.

VIII. Referências

[1] Dharmendra S. Modha (2014), Introducing a Brain-inspired Computer. Disponível: <http://www.research.ibm.com/articles/brain-chip.shtml>

[2] Tom Simonite (2014), IBM Chip Processes Data Similar to the Way Your Brain Does. Disponível: <http://www.technologyreview.com/news/529691/ibm-chip-processes-data-similar-to-the-way-your-brain-does/>

[3] Vince (2014), Processador TrueNorth da IBM pensa como o cérebro humano. Disponível: <http://www.variosbits.com.br/processador-truenorth-da-ibm-pensa-como-o-cerebro-humano/#sthash.A4XG16JP.dpuf> (Apresentação)

[4] Andrew Nere, Umberto Olcese, David Balduzzi, Giulio Tononi (2012), A Neuromorphic Architecture for Object Recognition and Motion Anticipation Using Burst-STDP. Disponível: <http://www.plosone.org/article/info:doi/10.1371/journal.pone.0036958> (Apresentação)

[5] Sebastian Anthony (2014), IBM cracks open a new era of computing with brain-like chip: 4096 cores, 1 million neurons, 5.4 billion transistors. Disponível: <http://www.extremetech.com/extreme/187612-ibm-cracks-open-a-new-era-of-computing-with-brain-like-chip-4096-cores-1-million-neurons-5-4-billion-transistors>

[6] Richard Adhikari (2013), IBM Creates Software Ecosystem for Thinking Chip. Disponível: <http://www.technewsworld.com/story/78676.html>

[7] DARPA, DARPA SyNAPSE Program (2013), Disponível: <http://www.artificialbrains.com/darpa-synapse-program> (Apresentação)

[8] Inovação Tecnológica (2013), IBM aprende como programar processadores inspirados no cérebro. Disponível: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=ibm-aprende-como-programar-processadores-inspirados-cerebro>

[9] Peter Clarke (2014), IBM Seeks Customers For Neural Network Breakthrough. Disponível: <http://electronics360.globalspec.com/article/4445/ibm-seeks-customers-for-neural-network-breakthrough>

[10] Redação Olhar Digital (2014), Novo processador da IBM imita funcionamento do cérebro humano. Disponível: <http://olhardigital.uol.com.br/noticia/novo-processador-da-ibm-imita-funcionamento-do-cerebro-humano/43476>

