

Avaliação de Desempenho de Redes-em-Chip Sem Fio *Single-Hop* com NAS *Parallel Benchmarks*

Amanda Maria P. Amorim, Henrique C. Freitas
Departamento de Ciência da Computação
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC Minas
Belo Horizonte, Brasil
amanda.amorim@sga.pucminas.br; cota@pucminas.br

Resumo—Em arquiteturas tradicionais de redes-em-chip, há influência do fio que pode reduzir a escalabilidade, rendimento e eficiência. Redes-em-chip sem fio (*Wireless Networks-on-Chip* - WiNoCs) são alternativas para fornecer comunicação entre núcleos de processadores *many-core* com alta largura de banda e baixo consumo de energia. Em aplicações paralelas há comunicações entre vários núcleos demandando um projeto de rede-em-chip eficiente. Portanto, o objetivo deste trabalho é projetar e avaliar uma arquitetura WiNoC *single-hop* usando cargas de trabalho paralelas. A metodologia é baseada em simulações através do simulador de rede NS-2 (*Network Simulator*) e aplicações do NAS *Parallel Benchmarks* (NPB). A arquitetura WiNoC é baseada na topologia *mesh* 2-D com tecnologia de rádio UWB (*Ultra Wide Band*). A transmissão entre núcleos é avaliada com base nas comunicações *unicast* (1:1 e N: 1) e *broadcast* (1: N e N: N). A arquitetura WiNoC *Single-hop* tem alto desempenho nas comunicações *broadcast*, alcançando no máximo 2,21 % de perda de pacotes. Nas comunicações *unicast*, a WiNoC *single-hop* tem alto desempenho atingindo no máximo 0,02 % de perda de pacotes e 0,2 ms de latência. A maior taxa de perda de pacotes e latência ocorrem nas comunicações N:1, devido a concorrência dos pacotes pelo nó destino. A WiNoC *Single-hop* alcançou até 63,12 J de consumo de energia. É possível concluir que a arquitetura WiNoC *Single-hop* apresenta alto desempenho, mas precisa de melhorias para reduzir o consumo de energia aumentando a sua eficiência.

Palavras-chave—Avaliação de Desempenho; Redes-em-Chip Sem Fio *Single-Hop*; Carga de Trabalho Paralela.

I. INTRODUÇÃO

A busca por melhoria de desempenho dos computadores, e os limites da arquitetura *single-core*, como consumo de potência e restrições do paralelismo em nível de instrução, favoreceu o surgimento da arquitetura *multi-core* [1]. Nesse tipo de arquitetura, um processador é composto por vários núcleos e cada núcleo é capaz de executar mais de um fluxo de instrução (*thread*) da aplicação. Dessa maneira, aplicações paralelas exploram melhor o desempenho dessa arquitetura, pois trechos concorrentes podem ser executados em paralelo, reduzindo assim o tempo total de execução das aplicações.

Durante o processamento paralelo de um programa, para que os resultados sejam gerados, muitas vezes é necessário a troca de mensagens entre as *threads*. As mensagens são trocadas por meio dos padrões de comunicação: 1 para 1, 1 para N, N para 1 e N para N. [2]. Para que essas comunicações possam ocorrer deve haver uma interconexão entre os núcleos do processador.

Para interligar os núcleos de um processador *multi-core*, são amplamente utilizados barramentos e chaves *crossbar* [3]. Essas soluções são inviáveis quando se trata de arquitetura *many-core* (processador com um número elevado de núcleos), pois o maior número de núcleos exige o aumento do tamanho do fio. Isso aumenta a latência de comunicação, dificulta o roteamento do fio e gera uma maior resistência, tornando necessário o uso de repetidores e *buffers*.

Como forma de prover uma interconexão *intra-chip* mais eficiente, as Redes-em-Chip conhecidas como NoCs (do inglês *Networks-on-Chip*) foram propostas [4]. As NoCs são responsáveis por estabelecer comunicação entre os núcleos com base em transmissão de pacotes. Nessa abordagem cada núcleo é associado a um roteador que é conectado a outros roteadores por meio de fios, pelos quais os pacotes trafegam até chegar no seu destino. As Redes-em-Chip reduzem os problemas relacionados com o fio e proveem paralelismo em nível de comunicação.

As NoCs reduziram o atraso na entrega das mensagens e o consumo de energia na rede. Mas, como o uso do fio não foi eliminado por completo, ele ainda é responsável por esses problemas. Devido a isso foram propostas as Redes-em-Chip Sem Fio (WiNoCs, do inglês *Wireless Networks-on-Chip*). Nas WiNoCs, roteadores são associados aos núcleos e sinais de rádio frequência são emitidos por antenas (interface de rede) para prover a comunicação. Assim é possível a troca de mensagens entre os núcleos reduzindo o consumo de energia e com alta largura de banda [5] [6].

Em processamento de aplicações paralelas, é esperado que a medida que o número de núcleos aumenta, o desempenho melhora na mesma proporção. Porém, na prática isso nem sempre é possível, devido aos limites de escalabilidade das próprias aplicações, da comunicação gerada por elas durante suas execuções, e das restrições oferecidas pela rede.

Dependendo das comunicações geradas, as WiNoCs podem ter desempenhos diversos. Isso porque certas características da arquitetura como topologia, protocolo de roteamento, atraso do canal, largura de banda e comunicações *multi-hop* e *single-hop* podem favorecer certas aplicações devido ao comportamento de envio de pacotes de rede (padrão de comunicação).

Neste cenário, acredita-se que as WiNoCs *single-hop* podem favorecer algumas aplicações, em decorrência de

diminuir a ocupação de vários roteadores nos saltos dos pacotes nas comunicações entre nós não adjacentes, além de reduzir a inundação da rede causada pelas retransmissões necessárias para que as mensagens *broadcast* atinjam todos os nós. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de WiNoC *single-hop* por meio de simulações dessa arquitetura executando cargas paralelas. Portanto, a contribuição deste artigo está na arquitetura WiNoC *single-hop* proposta como alternativa de comunicação intra-chip no contexto de aplicações paralelas.

O artigo está estruturado da seguinte forma: Seção 2 apresenta uma visão geral das Redes-em-Chip. A Seção 3 menciona os trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve a arquitetura WiNoC *single-hop* proposta. A Seção 5 apresenta a metodologia de avaliação e discute os resultados das simulações. A Seção 6 expõe as conclusões e os trabalhos futuros.

II. REDES-EM-CHIP

As Redes-em-Chip, NoC, são redes de comunicação baseadas em troca de pacotes, utilizadas para interconectar os núcleos de um *chip multi-core*. [7], [4]. Como ilustra a Figura 1, os principais componentes de uma NoC são:

- roteadores** – são responsáveis por encaminhar os pacotes, de acordo com um protocolo de roteamento escolhido, até que eles cheguem aos seus destinos;
- interfaces de redes** – conectam cada núcleo a um roteador;
- enlaces** – *links* entre os roteadores que consistem o meio por onde os pacotes trafegarão até o núcleo destino.

As aplicações paralelas em nível de *thread* são as que melhor exploram o desempenho das arquiteturas *multi-core*. Essas aplicações ao serem executadas são divididas em diversos fluxos de instruções (*threads*) que serão processados pelos núcleos da arquitetura. Durante a execução as *threads* se comunicam pela rede-em-chip de acordo com padrões de comunicação coletivas (do ponto de vista do comportamento da aplicação) definidas em [2]. A Figura II apresenta os principais padrões de comunicação que são:

- 1:1 (one-to-one)** – um núcleo da rede envia uma mensagem para um único núcleo (*unicast*);
- 1:N (one-to-all)** – um núcleo envia mensagens para todos os outros núcleos da rede (*broadcast*);

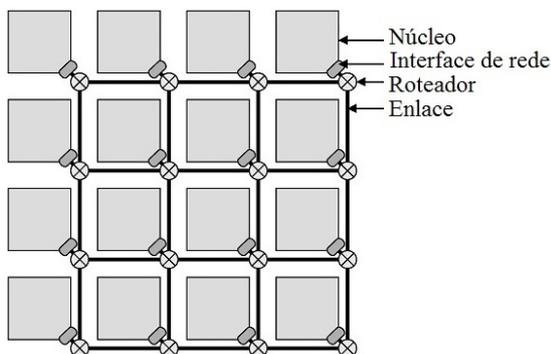


Figura 1. Principais componentes de NoCs [4].

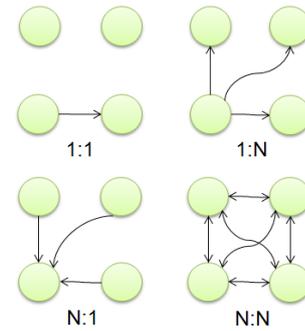


Figura 2. Principais padrões de comunicação coletivas [8].

- N:1 (all-to-one)** – vários núcleos da rede enviam mensagens para um mesmo núcleo (todos os núcleos enviam uma mensagem *unicast*);
- N:N (all-to-all)** – todos os núcleos enviam mensagens para todos os outros núcleos (todos os núcleos enviam uma mensagem *broadcast*);

Em [9], o autor destaca a relevância de conhecer as aplicações paralelas, segundo os padrões de comunicação coletivas. Para ele, esse conhecimento é importante na concepção das NoCs de propósito geral ou específico, a fim de que os programas consigam obter o maior desempenho possível da arquitetura.

Em [10], o autor aponta que o nível crescente de integração de núcleos nas NoCs, o que origina as arquiteturas *many-core*, faz com que os limites impostos pelo uso de fios voltem a ser significativos, representando um fator limitante para as Redes-em-Chip. Pois a comunicação por meio das NoCs entre núcleos distantes ocorre em múltiplos saltos, o que naturalmente utilizará mais fios na troca das mensagens, aumentando a dissipação de energia e a latência das comunicações. Diante disso, as Redes-em-Chip sem fio ou WiNoCs (do inglês, *Wireless Networks-on-Chip*) foram propostas com o objetivo de baixar a latência de comunicação e a dissipação de energia, eliminando esses efeitos causados pelo uso do fio, além de aumentar a largura de banda.

Assim como as NoCs, as *Wireless Networks-on-Chip* possuem em sua estrutura física roteadores conectados aos núcleos. Conforme exibe a Figura 3, a diferença está na interface de rede entre os roteadores, que nas WiNoCs são antenas que emitem sinais de rádio frequência para prover a comunicação reduzindo a dissipação de energia e a latência da chegada dos pacotes [5].

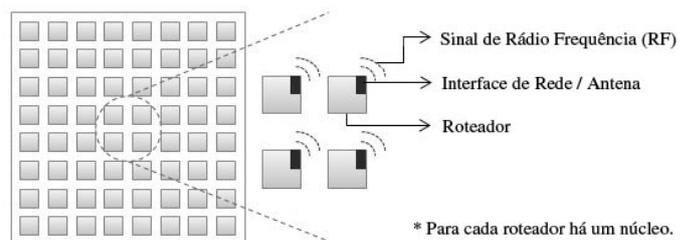


Figura 3. Principais componentes de WiNoCs, adaptado de [11].

III. TRABALHOS RELACIONADOS

As WiNoCs surgiram com o objetivo de solucionar os problemas de alta dissipação de energia e latência na comunicação decorrentes da expansão das arquiteturas *multi-core* para *many-core*. Visto que essa abordagem para estabelecer meios de comunicação entre os núcleos de um *chip* é um paradigma ainda recente, muitas pesquisas com diferentes propostas vêm sendo realizadas pela comunidade científica com o intuito de desenvolver arquiteturas WiNoCs mais eficientes e escaláveis.

Em [12] o autor expõe em seu relatório algumas das diferentes abordagens existentes em relação a, por exemplo, protocolos, hardware e topologias voltadas para WiNoCs. No que se refere a topologias, segundo ele, são encontrados tanto projetos de WiNoC "pura" quanto topologias híbridas (que contém conexões com e sem fio).

Segundo [10] se parte ou todas as conexões com fio de uma NoC forem substituídas por conexões *Wireless single-hop* com alta largura de banda, haverá redução da dissipação de energia e latência já que essas são causadas pelos múltiplos saltos necessários para realizar a troca de mensagens entre núcleos distantes. Para que não haja um elevado aumento na distância entre dois núcleos a medida que a rede aumenta, é proposto dividi-la em pequenas sub-redes. Onde a conexão entre os núcleos de uma sub-rede seja por meio de fios, pois eles estarão próximos, e as conexões entre as sub-redes sejam *wireless*.

No trabalho [10], os autores apresentam uma avaliação de desempenho comparando arquiteturas NoCs com duas arquiteturas híbridas diferentes (em uma as sub-redes possuem topologia *mesh* e a outra topologia *ring-star*). Para tanto, foram realizadas simulações em um simulador de rede com precisão de ciclos, com 64 núcleos. A carga de trabalho foi gerada por injeções de pacotes com distribuição uniforme de tráfego espacial. A conclusão obtida é que as arquiteturas híbridas propostas atingem desempenho melhores em relação as NoCs relacionadas.

Em [13] são discutidas as oportunidades e os desafios de três emergentes tecnologias de interconexão entre os núcleos de um *chip*. Sendo elas: topologia 3D, comunicações *nanophotonic* (óptica) e conexões *wireless*. Em relação as conexões *wireless*, neste trabalho foram destacadas as vantagens das arquiteturas híbridas, assim como em [10]. Ao final os autores concluem que as três tecnologias estudadas são promissoras para solucionar os problemas das tradicionais NoCs, mas que ainda são necessárias pesquisas para enfrentar os diversos desafios como a arquitetura do sistema e a fabricação de dispositivos.

Uma NoC híbrida também é analisada por [14]. As redes simuladas possuíam 128, 256 e 512 núcleos, e em todas elas o número de núcleos em cada sub-rede foi fixado em 16, variando apenas a quantidade de sub-redes. Os núcleos das sub-redes foram conectados em uma topologia *mesh* por meio de fios. Conexões com e sem fio foram utilizadas para interligar as sub-redes. O número de conexões *wireless* variaram entre 1, 6 e 24. Inicialmente os links *wireless* eram distribuídos aleatoriamente e depois era calculada qual a distribuição que obtinha o

melhor resultado. A conclusão obtida é que a inserção de conexões *wireless* de longo alcance em uma NoC, melhora significativamente o seu desempenho. Além disso, o ganho de desempenho é maior a medida que o sistema aumenta.

Outro trabalho que propõe comunicações *single-hop* por meio de conexões *wireless* para longas distâncias em uma NoC híbrida é o [15]. Para analisar a rede proposta, uma arquitetura com 100 núcleos divididos em 4 sub-redes foi simulada em um simulador System-C. A fim de aplicar o comportamento de distribuição temporal e espacial de aplicações práticas, os autores utilizaram três técnicas de geração de tráfego: *Burstiness*, injeção com distribuição Gaussiana e distância dos saltos. A análise das simulações indica que a inserção dos roteadores *wireless* entre as sub-redes geraram uma melhora na vazão, além de reduzir a dissipação de energia e a latência.

Os autores de [16] propõem uma arquitetura denominada por eles como McWiNoC (*multi-channel wireless Network-on-Chip*), que consiste em uma WiNoC com conexões ultra-curtas por meio da tecnologia de rádio UWB com multi-canais. Nessa abordagem as comunicações entre núcleos não adjacentes ocorrem por meio de *multi-hops*. Os autores também desenvolveram um algoritmo de roteamento baseado na localização dos núcleos e um método para impedir que ocorram *deadlocks*. A fim de avaliar a arquitetura projetada, um simulador foi desenvolvido. Nas simulações foram utilizadas cargas de trabalho sintéticas. Os resultados mostram que a McWiNoC proposta possui melhor desempenho em relação as NoCs tradicionais.

Uma rede dividida em sub-redes e interligada utilizando conexões com e sem fio também é projetada por [6]. A proposta consiste em sub-redes com topologia *mesh*, em que os seus núcleos estão conectados entre si e em um *hub* central por meio de fios. No segundo nível da rede, todas as sub-redes estão conectadas também por meio de fios em uma topologia anel. Inicialmente as conexões *wireless* disponíveis são distribuídas probabilisticamente entre pares de *hubs*, baseada na distância em número de saltos entre eles. Após a inicialização da rede é utilizada a heurística *Simulated Annealing*, para redistribuir as conexões *wireless* de forma a otimizar o seu desempenho. Os testes foram realizados com 128, 256 e 512 núcleos, variando o número de sub-redes e de núcleos por sub-rede. Os resultados demonstram que a rede proposta possui melhor desempenho nas taxas de transferência, dissipação de energia e latência de comunicação.

Na literatura não foi encontrada nenhuma avaliação de uma arquitetura WiNoC com comunicações exclusivamente *single-hop* estimuladas por aplicações paralelas. Foram encontradas apenas propostas híbridas que são em parte desse tipo. Dessa maneira, esse trabalho possui como contribuição a arquitetura WiNoC *single-hop* com cargas de trabalho de aplicações paralelas do NPB (*NAS Parallel Benchmarks*). Espera-se com esta abordagem reduzir os problemas decorrentes da inundação da rede pelas comunicações *broadcast*. Além de verificar os possíveis ganhos e impactos consequentes das comunicações exclusivamente

single-hop.

IV. ARQUITETURA WiNoC SINGLE-HOP PROPOSTA E O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

No trabalho [8], o qual faz parte do grupo de pesquisa deste artigo, foi desenvolvido um ambiente de simulação de WiNoCs usando o simulador de rede Network Simulator (NS-2). Em [17] foi realizada a integração dos traces do NAS com o NS-2. Esse ambiente de simulação foi adaptado neste artigo para viabilizar a simulação de WiNoCs *single-hop*. A Tabela I apresenta alguns dos parâmetros da arquitetura WiNoC *single-hop* proposta neste artigo. A topologia de rede utilizada é a *mesh*. A tecnologia de rádio da WiNoC é a *Ultra Wide Band* (UWB). O tamanho do buffer foi fixado em 10 pacotes e cada pacote possui tamanho máximo de 38 bytes. Os parâmetros que caracterizam uma WiNoC *single-hop* é a não utilização de protocolo de roteamento e os valores das potências dos receptores, dos transmissores e dos sinais que foram ajustados para as comunicações ocorrerem em um único salto.

Nas subseções a seguir são apresentados o simulador NS-2, a adaptação realizada no mesmo e os valores das potências necessários para que as comunicações sejam realizadas de forma *single-hop*.

A. Network Simulator

O *Network Simulator 2* é um simulador de rede baseado em eventos discretos, popular no meio acadêmico por ser gratuito e de código fonte aberto. Seu projeto começou na Universidade de Berkeley e conta com a colaboração de diversos pesquisadores. É baseado nas camadas de rede do modelo OSI e possui implementada diversas tecnologias como: políticas de filas, protocolos de roteamento, agente de transporte (TCP e UDP), protocolos de rede *wireless* e aplicações geradoras de tráfego. Além disso, ele também possui uma interface de visualização chamada Network Animator (NAM) [18], [8].

O NS-2 foi implementado utilizando duas linguagens: C++ e Otcl. Sua base foi desenvolvida em C++ por ser

uma linguagem mais robusta para implementação de algoritmos, já que ela manipula com eficiência *bytes* e pacotes. Já a parte de configuração dos cenários de simulação foi escrita em Otcl por ser uma linguagem interpretada de *script* TCL com orientação a objeto e interativa. Assim, os parâmetros podem ser alterados para uma nova simulação sem ter que recompilar todo o código do simulador.

Dessa maneira, para configurar uma simulação no NS-2 é utilizado um *script* TCL. É nesse *script* que o usuário descreve o número de nós da rede, a sua topologia, o tipo de enlace, o agente de transporte, protocolos de roteamento, o tipo de tráfego, dentre outros.

O NS-2 gera um arquivo de rastreamento da rede, que é uma espécie de log chamado *trace*. Nesse arquivo são registradas informações sobre cada pacote trafegado na rede. Essas informações são referentes ao tipo de evento (envio, recebimento ou perda do pacote), instante do evento, endereços de origem e destino, consumo de energia pelo nó envolvido no evento, identificador, tamanho e tipo do pacote, identificador do fluxo de mensagem ao qual o pacote pertence, dentre outros.

O ambiente de simulação utilizado nesta pesquisa consiste no simulador NS-2 versão 2.29 integrado com os módulos *Ultra Wide Band* [19] e *Fast Broadcast* [20].

B. Potências para comunicações *single-hop*

Conforme ilustra a Figura 4, para que as comunicações entre os núcleos de uma WiNoC sejam *single-hop* é necessário que o sinal de transmissão empregado (IR-UWB) seja propagado por toda a rede, atingindo todos os nós. Dessa maneira as comunicações entre todos os núcleos da rede poderão ser feitas em um único salto.

Para tanto, foi identificado que era preciso aumentar três parâmetros utilizados na configuração das WiNoCs, sendo eles: potência do transmissor, potência do receptor e potência do sinal. Neste trabalho foi decidido manter as relações existentes entre essas três potências. Por isso, para aumentá-las os seus valores foram multiplicados por um mesmo fator.

A fim de encontrar as menores potências para o sinal atingir todos os nós da rede, independente da localização do nó origem e dos nós destino, testes foram realizados com cargas sintéticas criadas para testar a transmissão de pacotes entre os nós, principalmente as comunicações *unicast* entre o par de nós que possui a maior distância da rede. Além disso, as comunicações do tipo *broadcast*

Tabela I
CARACTERÍSTICAS DA ARQUITETURA SIMULADA

| Parâmetro | Valor |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Topologia | <i>Mesh</i> |
| Distância entre os nós | 1 mm |
| Tamanho do nó (núcleo/roteador) | 0,5 mm ² |
| Abordagem ad-hoc | <i>Single-hop</i> |
| Tecnologia de rádio | UWB |
| Frequência central | 3,6 GHz |
| Altura da antena | 3 mm |
| Potência do transmissor | Varia com o tamanho da rede |
| Potência do receptor | Varia com o tamanho da rede |
| Taxa de dados | 1,16 Gbps |
| Política de fila | FIFO |
| Tamanho máximo da fila | 10 pacotes |
| Tamanho máximo do pacote | 38 bytes |

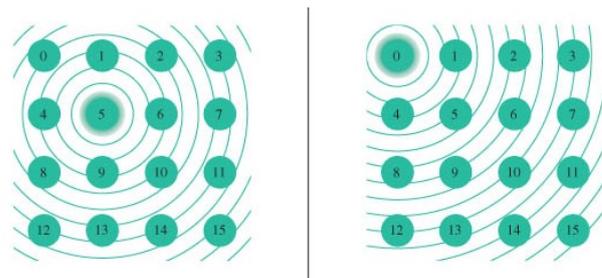


Figura 4. Comunicações *single-hop* em uma WiNoC

Tabela II
 POTÊNCIAS ALTERADAS PARA O CONTEXTO *SINGLE-HOP* (EM MILIWATT)

| Número de processos | Potência do receptor | Potência do transmissor/sinal |
|---------------------|----------------------|-------------------------------|
| 4 | 1,6 | 0,9 |
| 8 | 4,16 | 2,34 |
| 16 | 7,36 | 4,14 |
| 32 | 23,52 | 13,23 |
| 64 | 39,69 | 22,32 |
| 128 | 110,88 | 62,37 |
| 256 | 181,92 | 102,33 |

também foram verificadas. Esses testes foram realizados para todas as redes de tamanhos diferentes, e os valores das potências foram alterados até que fossem encontrados os valores desejados pelo critério já mencionado. A Tabela II apresenta os valores finais obtidos por meio das simulações para cada tamanho de rede.

Em uma WiNoC *single-hop* não faz sentido realizar roteamento de pacotes, pois como o próprio nome já indica as comunicações ocorrem de forma direta em um único salto. Neste sentido, para que não haja roteamento nas comunicações 1 para N, foi necessário uma adaptação no ambiente de simulação.

C. Adaptação no simulador

O módulo *Fast Broadcast* integrado ao simulador é responsável por realizar transmissões *broadcast* em redes *multi-hop*, para isso, por meio de um algoritmo de otimização alguns roteadores são selecionados para retransmitirem o pacote recebido referente a mensagens *broadcast* para os seus vizinhos, fazendo com que todos os nós a recebam.

Para que o módulo permanecesse realizando as comunicações *broadcast* porém sem que os pacotes fossem retransmitidos, foi realizado um estudo sobre o módulo e identificado que as retransmissões eram geradas no método *process_data_BroadcastMsg* chamado após o recebimento de um pacote no método *recv* da classe *BroadcastAgent*. Portanto, para que os reenvios não ocorressem mais o método *recv* foi alterado para não executar o método *process_data_BroadcastMsg*.

Após as alterações também foram utilizadas cargas sintéticas em simulações para testar a alteração realizada. A partir dos testes foi verificado que a adaptação não afetou a realização das comunicações *broadcast* e que os pacotes não eram mais retransmitidos. Dessa maneira, de acordo com o objetivo, o módulo *Fast Broadcast* permaneceu sendo usado para gerar as comunicações 1 para N sem realizar roteamento de pacotes.

V. RESULTADOS

A. Metodologia de Avaliação

Para avaliar o comportamento da WiNoC *single-hop* proposta, ao realizar comunicações existentes em aplicações paralelas foi decidido utilizar alguns programas do

NPB (NAS *Parallel Benchmarks*) [21]. Essa escolha deve-se por essas aplicações serem indicadas para a avaliação de desempenho de supercomputadores paralelos.

Os programas utilizados foram: BT (*Block Tridiagonal*), CG (*Conjugate Gradient*), EP (*Embarassingly Parallel*), FT (*Fast Fourier Transform*), IS (*Integer Sort*) e MG (*Multi-Grid*) configurados com tamanho de problema da classe A [22] e o modelo de programação MPI.

Esses programas foram instrumentados e executados com 4, 8, 16, 32, 64 e 256 processos em um *cluster* de multiprocessadores [8], a fim de registrar informações de comunicações ao longo da execução (nó origem, nó destino, instante de tempo, tipo de envio, etc). Esses traços foram manipulados para gerar os arquivos de entrada de tráfego para as simulações no NS-2. Neste artigo foram utilizados os arquivos de entrada de tráfego gerados por [8] referentes as comunicações dos programas escolhidos.

As simulações das WiNoCs *single-hop* foram avaliadas segundo as seguintes métricas: pacotes enviados (percentual de pacotes enviados), pacotes perdidos (percentual de pacotes perdidos), taxa de injeção (número médio de *bits* de pacotes injetados pelos nós na rede por segundo (bps)), vazão (número médio de *bits* de pacotes recebidos pelos nós da rede por segundo (bps)), latência (atraso do pacote da origem para o destino, em milissegundos) e consumo de energia (consumo de energia de cada nó e da rede por completo, em joule).

B. Avaliação de Desempenho

A avaliação de desempenho da WiNoC *single-hop* está baseada nas comunicações *unicast* utilizadas para os padrões de comunicação 1:1 e N:1 e *broadcast* para 1:N e N:N nas diferentes cargas.

A carga de trabalho CG possui 99,99% dos pacotes enviados do tipo *unicast* referentes ao padrão 1:1. Em relação à perda de pacotes desse tipo a WiNoC *single-hop* projetada obteve um excelente desempenho com perda máxima de 0,02%.

Esse desempenho favorável também pode ser observado na carga MG que é composta predominantemente por comunicações do tipo *unicast* (mais que 87%). Uma pequena parcela dessas comunicações são provenientes do tipo N:1 (neste padrão são realizadas N transmissões do tipo *unicast* ao mesmo tempo para um único destino), e ocasionaram uma perda máxima de 4,52% dos pacotes. Essa perda ocorreu devido a competição dos pacotes pelo nó destino. Não é permitido que um mesmo nó receba mais de um pacote ao mesmo tempo, fazendo com que dos N pacotes que chegam ao mesmo instante nas comunicações N:1, apenas um seja recebido.

A carga de trabalho EP é 100% do tipo *broadcast*. Quando avaliada a perda de pacotes, a WiNoC simulada apresentou um desempenho extremamente positivo às cargas de trabalho que possuem exclusivamente comunicações desse tipo, dado que não houve nenhuma perda nas simulações dessa carga.

A carga de trabalho FT é composta por mais de 55% de comunicações do tipo *broadcast* e as simulações

registraram uma perda máxima de 0,06% dos pacotes desse tipo. Em relação as comunicações *unicast* elas são geradas pelo padrão de comunicação coletiva N:1. Como também ocorreu uma chegada simultânea de pacotes no nó destino, as comunicações *unicast* apresentaram uma elevada e crescente perda chegando a 98,36% no cenário de 256 nós.

Na carga IS, as comunicações são predominantemente do tipo *broadcast* com mais de 90,98%. O restante das comunicações se dividem entre os padrões 1:1 e N:1, sendo a maior parte do tipo N:1. Por esse motivo, a perda de pacotes das comunicações *unicast* chega a 90,93% no cenário com 256 nós. Em relação as comunicações *broadcast* a perda máxima foi de 1,02% dos pacotes.

A vazão média da rede pode ser observada na Tabela III. Em relação a vazão proveniente das comunicações *unicast*, a carga CG apresentou valores iguais as taxas de injeção. Já a média das vazões desse tipo de comunicação nas cargas FT, IS e MG foram menores que as médias das taxas de injeção como consequência das perdas de pacotes. Essa diferença foi menor na carga MG onde a perda de pacote também foi menor.

No que se refere às vazões médias das comunicações do tipo *broadcast*, as vazões são maiores que as respectivas taxas de injeção e aumentam consideravelmente à medida que a rede cresce. Isso ocorre por causa da inundação da rede decorrente das comunicações *broadcast* em que cada pacote injetado por um roteador na rede é recebido pelos N-1 roteadores restantes. Na carga MG, o impacto do crescimento da rede é menor em relação a vazão, havendo até uma redução da mesma no cenário de 8 nós quando comparado ao de 4. Esse é um comportamento da própria carga que envia mais pacotes desse tipo no cenário com 4 roteadores.

Na Figura 5 podemos observar que a WiNoC *single-hop* proposta apresentou um comportamento não uniforme em relação a quantidade de nós nas latências médias das comunicações *unicast* da carga CG. Isso acontece pelas comunicações ocorrerem entre poucos nós da rede e a distância entre esses nós variar de acordo com o modo em que eles foram distribuídos na arquitetura.

Nas cargas FT e IS o comportamento referente as latências das comunicações *unicast* também não é uniforme. Esse fato é justificado em relação as comunicações do tipo N:1. Durante as trocas de pacotes, se mais de um nó deseja enviar um pacote ao mesmo instante para um mesmo destino, é realizada uma seleção de qual pacote será recebido, já que o roteador receptor só consegue receber um pacote por vez, e os demais pacotes são descartados. Esse comportamento causa reflexos na porcentagem de perda de pacotes conforme apresentado anteriormente. Quando o pacote do próprio roteador receptor é selecionado esta latência é praticamente zero, mas na escolha de receber o pacote de outra origem é realizada uma negociação entre os nós envolvidos que aumenta a latência da comunicação.

A latência das comunicações *unicast* da carga MG na WiNoC *single-hop* a partir de 8 roteadores aumenta juntamente com o crescimento da rede. Esse aumento é

Tabela III
VAZÃO (BPS)

| Número de nós | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 |
|------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Carga CG | | | | | | | |
| Unicast | 6,92 | 7,46 | 10,21 | 8,64 | 6,78 | 5,43 | 5,10 |
| Broadcast | 0,19 | 0,45 | 0,96 | 1,98 | 4,03 | 8,13 | 16,32 |
| Total | 6,93 | 7,46 | 10,21 | 8,64 | 6,78 | 5,43 | 5,10 |
| Carga EP | | | | | | | |
| Unicast | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Broadcast | 0,68 | 4,94 | 26,28 | 72,81 | 226,07 | 750,65 | 922,63 |
| Total | 0,68 | 4,94 | 26,28 | 72,81 | 226,07 | 750,65 | 922,63 |
| Carga FT | | | | | | | |
| Unicast | 0,24 | 0,34 | 0,13 | 0,13 | 0,16 | 0,06 | 0,02 |
| Broadcast | 4,13 | 24,10 | 106,75 | 175,95 | 749,31 | 1405,7 | 2112,6 |
| Total | 4,30 | 24,37 | 106,82 | 176,01 | 749,41 | 1405,8 | 2112,6 |
| Carga IS | | | | | | | |
| Unicast | 0,45 | 0,17 | 0,58 | 0,26 | 1,45 | 0,22 | 0,15 |
| Broadcast | 28,66 | 50,10 | 157,44 | 236,51 | 569,13 | 760,18 | 1203,5 |
| Total | 21,60 | 50,17 | 157,50 | 236,53 | 569,23 | 760,22 | 1203,5 |
| Carga MG | | | | | | | |
| Unicast | 16,65 | 7,86 | 13,78 | 7,99 | 6,62 | 9,25 | 9,52 |
| Broadcast | 3,07 | 2,63 | 11,08 | 12,21 | 21,10 | 58,75 | 135,64 |
| Total | 19,40 | 10,39 | 24,40 | 19,96 | 27,60 | 67,40 | 144,63 |

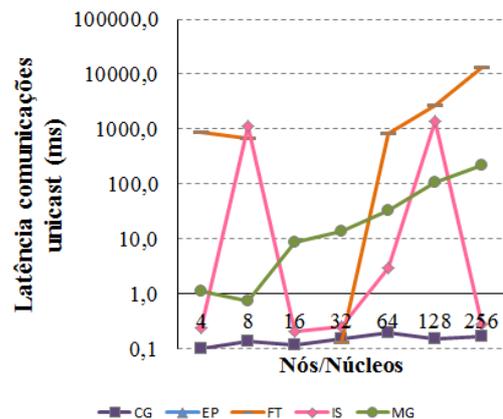


Figura 5. Latência das comunicações unicast

esperado pelo alto número de comunicações. Apesar da carga CG ter mais comunicações a latência da carga MG é maior por ela ser executada em um tempo menor o que aumenta a concorrência pelo meio de transmissão.

Na Figura 6 são exibidas as latências médias das comunicações *broadcast*. As latências da carga CG são bem inferiores às demais, visto o baixo número de comunicações *broadcast*. Já nas demais cargas é possível observar que a latência aumenta com o crescimento da rede. Além disso, a latência das cargas EP, FT, IS e MG acompanham o aumento do número de comunicações existentes nelas.

Nas Figuras 7 e 8 são exibidos respectivamente o consumo de energia médio de cada nó e da rede. Como já esperado, observa-se que o consumo de energia da rede é proporcional ao consumo médio de cada nó. O consumo de energia nas simulações da arquitetura proposta com

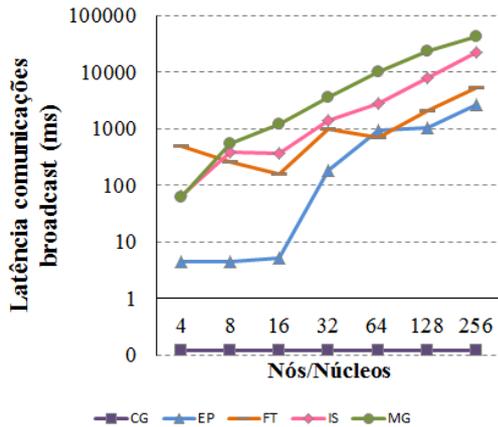


Figura 6. Latência das comunicações broadcast

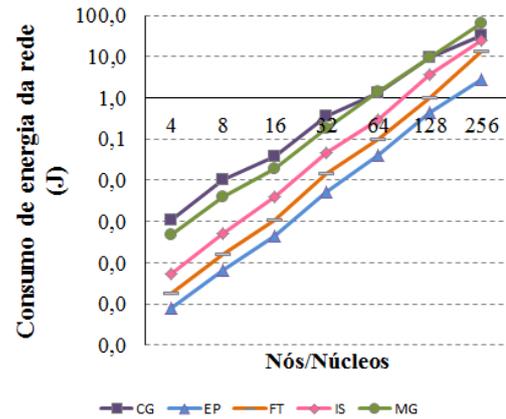


Figura 8. Consumo de energia da rede

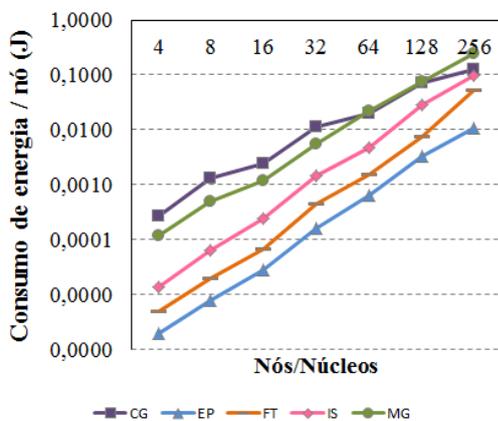


Figura 7. Consumo de energia de cada nó

as cargas trabalhadas aumenta junto com crescimento da rede. Além disso o consumo de energia por cada carga está de acordo com o número de comunicações existentes em cada uma delas. Esse comportamento só é alterado entre as cargas CG e MG a partir de 64 nós. Isso ocorre devido à carga MG possuir mais comunicações do tipo *broadcast* do que a carga CG, e estas comunicações se tornarem mais representativas com o aumento de nós na rede.

VI. CONCLUSÃO

Diante do desejo por executar programas mais complexos em um tempo hábil, e da crescente tendência das aplicações serem cada vez mais paralelas, é previsto que, no futuro, sejam agregados dezenas a centenas de núcleos em um único processador (arquitetura *many-core*). Como forma de garantir um melhor desempenho para os processadores *many-core*, surgiu a proposta de Redes-em-Chip sem fio (WiNoC). Essa abordagem consiste em roteadores conectados aos núcleos que se comunicam por meio de antenas que transmitem sinal de rádio frequência. Desse modo, os pacotes são enviados pelos roteadores para os seus vizinhos até que eles cheguem ao seu destino.

Como forma de melhorar o desempenho da arquitetura WiNoC tradicional, neste artigo é apresentada e avaliada

uma proposta de WiNoC *single-hop*, ou seja, em que todas as comunicações são realizadas em um único salto. Para tanto, foi adaptado o ambiente de simulação criado em [8], no simulador NS-2, para o contexto *single-hop*. Simulações foram realizadas com as cargas de trabalho do NAS *Parallel Benchmarks* (CG, EP, FT, IS e MG). Os padrões de comunicação coletiva 1:1 e N:1 existentes nas cargas foram simulados pelas comunicações *unicast*, e os padrões 1:N e N:N por meio das comunicações *broadcast*.

Os resultados das simulações da WiNoC *single-hop* com as cargas que possuem predominantemente comunicações *unicast* (CG e MG) mostraram o excelente desempenho da arquitetura ao registrarem baixa perda pacotes e latência. No entanto, as cargas de trabalho FT e IS registraram uma alta perda de pacotes e latência. Isso se deve as comunicações do tipo N:1, que chegam simultaneamente ao nó destino.

Para as comunicações *broadcast* a WiNoC *single-hop* simulada mostrou-se extremamente favorável. Na carga EP que possui 100% de comunicações *broadcast* não foi perdido nenhum pacote e a perda máxima foi de 2,21% na carga MG. A arquitetura também apresentou um bom resultado ao analisar a latência dessas comunicações.

O consumo de energia foi identificado como um ponto da arquitetura a ser estudado em busca de melhorias. Na carga com o maior número de comunicações *broadcast* (MG), o consumo de energia pela rede atingiu 63,12 J no cenário com 256 nós. Esse consumo de energia é justificado pelo uso de potências maiores pelos transmissores, receptores e sinais, necessário para que as comunicações ocorressem em um único salto. Além disso, o fato de todas as comunicações *unicast*, independentemente da distância entre a origem e o destino, utilizarem estas potências também aumentam o consumo de energia.

Como forma de reduzir o alto consumo de energia pela WiNoC *single-hop*, deve ser explorado em trabalhos futuros arquiteturas com outras topologias como, *mesh* 3D que ao diminuir as distâncias entre os nós, permite a redução também das potências. Outras opções a serem trabalhadas são as WiNoCs híbridas, que envolvem transmissões com e sem fio e WiNoCs *multi-hop* com potências maiores que

reduzam o número de saltos nas comunicações. Características como tamanho da antena e frequência também devem ser trabalhadas com o objetivo de reduzir as potências necessárias para realizar as comunicações em um único salto, reduzindo assim o consumo de energia.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Fundo de Incentivo à Pesquisa da PUC Minas (FIP/PUC Minas).

REFERÊNCIAS

- [1] H. C. Freitas, “Arquitetura de noc programável baseada em múltiplos clusters de cores para suporte a padrões de comunicação coletiva,” Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Informática, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio Grande do Sul, Brasil, 2009. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10183/16656>
- [2] J. Duato, S. Yalamanchili, and N. Lionel, *Interconnection networks*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [3] R. Kumar, V. Zyuban, and D. M. Tullsen, “Interconnections in multi-core architectures: Understanding mechanisms, overheads and scaling,” in *Proc. 32nd International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, jun 2005, pp. 408–419.
- [4] T. Bjerregaard and S. Mahadevan, “A survey of research and practices of network-on-chip,” *Computing Surveys*, vol. 38, no. 1, pp. 1–51, June 2006. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1132952.1132953>
- [5] D. Zhao, “Ultrapformance wireless interconnect nanonetworks for heterogeneous gigascale multi-processor SoCs,” in *Proc. 2th Workshop on Chip Multiprocessor, Memory Systems and Interconnects*. Beijing: CMP-MSI, Jun. 2008, pp. 1–3.
- [6] A. Ganguly, K. Chang, S. Deb, P. P. Pande, B. Belzer, and C. Teuscher, “Scalable hybrid wireless network-on-chip architectures for multi-core systems,” *Journal Transactions on Computers*, vol. 60, no. 10, pp. 1485–1502, 2011.
- [7] L. Benini and G. D. Micheli, “Networks on chips: a new SoC paradigm,” *Journal Computer*, vol. 35, no. 1, pp. 70–78, Jan. 2002.
- [8] P. A. C. Oliveira, “Avaliação de desempenho e caracterização de cargas de trabalho paralelas para redes-em-chip sem fio,” Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. [Online]. Available: http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/Informatica_OliveiraPAC_1.pdf
- [9] H. C. Freitas, L. M. Schnorr, M. A. Z. Alves, and P. O. A. Navaux, “Impact of parallel workloads on NoC architecture design,” in *Proc. 18th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing*. Pisa: PDP, Feb. 2010, pp. 551–555.
- [10] A. Ganguly, K. Chang, P. P. Pande, B. Belzer, and A. Nojeh, “Performance evaluation of wireless networks on chip architectures,” in *Proc. 10th International Symposium on Quality of Electronic Design*. San Jose: ISQED, Mar. 2009, pp. 350–355.
- [11] P. A. C. Oliveira, F. L. P. Duarte-Figueiredo, C. A. P. S. Martins, H. C. Freitas, C. P. Ribeiro, M. Castro, V. Marangozova-Martin, and M. J-F., “Performance evaluation of winocs for parallel workloads based on collective communications,” in *Proc. IADIS Applied Computing*. Rio de Janeiro: IADIS Applied Computing, Nov. 2011, pp. 307–314.
- [12] X. Li, “Survey of wireless network-on-chip systems,” Auburn University, Technical report. Auburn University, Alabama, USA, Tech. Rep., May. 2012. [Online]. Available: <http://www.eng.auburn.edu/agrawvd/THESIS/LI/report.pdf>
- [13] L. Carloni, P. Pande, and Y. Xie, “Networks-on-chip in emerging interconnect paradigms: Advantages and challenges,” in *Proc., 2009 3rd ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, May. 2009, pp. 93–102. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/NOCS.2009.5071456>
- [14] P. P. Pande, A. Ganguly, K. Chang, and C. Teuscher, “Hybrid wireless network on chip: a new paradigm in multi-core design,” in *Proc. 2th International Workshop on Network on Chip Architectures*. New York: NoCArc, Dec. 2009, pp. 71–76.
- [15] C. Wang, W.-H. Hu, and N. Bagherzadeh, “A wireless network-on-chip design for multicore platforms,” in *Proc. 19th International Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing*. Ayia Napa: PDP, Feb. 2011, pp. 409–416.
- [16] D. Zhao, Y. Wang, J. Li, and T. Kikkawa, “Design of multi-channel wireless noc to improve on-chip communication capacity,” in *Proc. 5th ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip*. Pittsburgh: NOCS, May. 2011, pp. 177–184. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1999946.1999975>
- [17] A. M. P. Amorim, P. A. C. Oliveira, and H. C. Freitas, “Integrando traços de execução de aplicações paralelas ao network simulator para simulação de winoc,” in *Anais..., Workshop de Iniciação Científica, XIII Simposio em Sistemas Computacionais*. Petrópolis: WSCAD-WIC, Out. 2012, pp. 1–4.
- [18] NS, “Network simulator (ns-2),” 2013, disponível em <http://isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em mai.
- [19] NS-UWB, “Ns-2 ultra wide-band (uwb) mac and phy simulator,” 2013, disponível em <http://uwb.epfl.ch/ns-2/index.html>. Acesso em mai.
- [20] FAST-BROADCAST, “Resources - fast broadcast modules for ns-2,” 2013, disponível em <http://www.math.unipd.it/~palazzi/fastbroadcast.html>. Acesso em mai.
- [21] NPB, “Nas parallel benchmarks,” 2013, disponível em <http://www.nas.nasa.gov/publications/npb.html>. Acesso em mai.
- [22] NPB, “Problem sizes and parameters in nas parallel benchmarks,” 2013, disponível em http://www.nas.nasa.gov/publications/npb_problem_sizes.html. Acesso em mai.