



**XXII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GAT/14  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE ENERGIA UTILIZANDO ESTABILIDADE TRANSITÓRIA, ELETROMAGNÉTICOS TRANSITÓRIOS E FPGA BASEADOS EM ALGORITMOS DE ALTO DESEMPENHO**

**Simone C N Araujo (\*)  
TAG**

**Christian Dufour  
OPAL-RT Technologies**

**RESUMO**

Este artigo discute a evolução recente das técnicas de computação de alto desempenho para a simulação em tempo real de sistemas de potência. Dependendo do tamanho da rede e a resolução requerida, são utilizados diferentes métodos: método fasorial para simulação de estabilidade (TS, Transient Stability), simulação de transitórios eletromagnéticos (EMT, Electromagnetic Transients). Os modernos e rápidos dispositivos de eletrônica de potência, muitas vezes, também, exigem simulações com alta resolução em FPGAs. Discute também, estes algoritmos, sua disponibilidade comercial, juntamente com alguns pontos de referência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas de grande escala, simulação de sistema de potência, estabilidade transitória do sistema de potência, simulação em tempo real, FPGA.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Simuladores têm sido amplamente utilizados no planejamento e projeto de sistemas elétricos por décadas. A simulação tem desempenhado um papel fundamental no êxito do desenvolvimento de muitas aplicações desde o layout das linhas de transmissão até otimização de dispositivos motores na área de transporte. Nos últimos anos, a análise e operação dos sistemas de potência tornou-se, também, cada vez mais complexa, por diversas razões. A inclusão de fontes de energias renováveis com geração intermitente e assíncrona e ainda uma maior interligação da rede são alguns exemplos desta crescente complexidade. Estes simuladores podem utilizar diversos algoritmos que dependem do tamanho da rede em estudo e a resolução de simulação requerida ou a largura de banda.

A análise de estabilidade transitória (TS) lida principalmente com a estabilidade na transferência de potência em sistemas de energia de grande porte. Em essência, a estabilidade em um sistema de potência AC depende do sincronismo das múltiplas fontes rotatórias que o compõem. Durante distúrbios, as unidades geradoras estão sujeitos a variações de ângulo e velocidade o que pode levar à perda de sincronismo e colapso do sistema.

A necessidade de simulação, em tempo real, para estudos de estabilidade transitória destacou-se pelos recentes *black-outs* que ocorreram na América do Norte (14 de agosto de 2003) e na Europa (04 de novembro de 2006). De acordo com a análise dos fatores que contribuíram para esses eventos, a avaliação do comportamento dinâmico em tempo real e monitoramento do sistema foram identificadas como as questões mais importantes [6] [8].

Simuladores de transitórios eletromagnéticos em tempo real (EMT) são utilizados para muitas finalidades. Por exemplo, são utilizados para validação *Hardware-In-the-Loop* (HIL) de complexos dispositivos de eletrônica de potência do sistema de energia, como HVDC ou STATCOM, antes de serem conectados em campo [3] [21] [25].

(\*) Av. Sebastião Eugênio de Camargo, n° 157 - CEP 05.360-010 – Vila Butantã - São Paulo, SP, – Brasil  
Tel: (+55 11) 3368-1029— Email: simone.araujo@tagpower.com.br

## 2.0 - ALGORITIMOS UTILIZADOS PARA SISTEMA DE POTÊNCIA E SUAS APLICAÇÕES

Dependendo do tamanho do sistema de potência a ser estudado, vários algoritmos e pacotes de simulação podem ser usados. Os algoritmos que consideraremos são TS, EMT e também simulação FPGA de alta resolução. Vários fatores influenciam nesta seleção, tais como, recursos de computação disponíveis e as necessidades dos algoritmos a serem utilizados. Outros critérios que também devem ser considerados na seleção do algoritmo incluem a escolha do pacote de simulação, a interface gráfica e a capacidade de distribuir as tarefas computacionais, automaticamente em processadores multi-core individuais ou em computadores multiprocessadores.

A Figura 1, abaixo, mostra os algoritmos para simulação recomendados versus o tipo de estudo realizado.

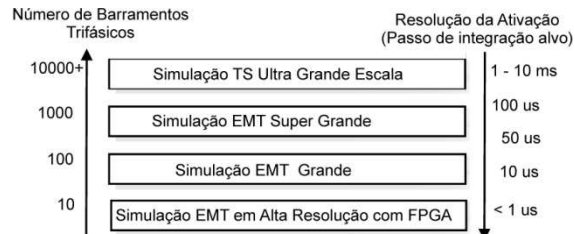


Figura 1- Pacote simulação versus tamanho da rede

No centro do diagrama mostrado na Figura 1, encontram-se algoritmos para a simulação EMT. Este tipo de simulação é usada para estudar fenômenos de rápida duração, tais como transitórios elétricos que ocorrem durante falhas ou efeitos de propagação de ondas nas linhas de transmissão. Estes algoritmos são projetados para trabalhar com passo de integração na faixa de 10-100µs, permitindo o estudo de todos os fenômenos elétricos que ocorrem normalmente na faixa de frequência de 2-5 kHz. Um dos mais conhecidos programas de EMT chama-se EMTP [10] (juntamente com as variantes ATP e EMTP-RV) e tem vem usados por décadas nas empresas de eletricidade em todo o mundo.

Quando se faz necessário a realização de simulações de EMT, em tempo real, para redes com menos de 100 barramentos (trifásicos), o simulador *eMEGAsim*, baseado no algoritmo ARTEMiS [2] [3] é uma boa opção pois é integrado diretamente com o Blockset SimPowerSystems™ da MathWorks® (MATLAB®/ Simulink®) e, portanto, bem adaptado para este tamanho de rede. A integração do *eMEGAsim* com Simulink®, também, dá ao usuário uma grande flexibilidade, em termos de modelagem, e permite o acoplamento fácil de outros de domínios de simulação através das diversas *toolboxes* especializadas do Simulink®.

Nas simulações de EMT em tempo real de sistemas de potência que possuem entre 100 e 1.000 barramentos, o Hypersim simulador [21] apresenta características interessantes, quais sejam:

1. Interface gráfica especializada para o usuário, apoiada por diagrama unifilar.
2. Particionamento automático de tarefas para facilitar a simulação em tempo real com multi-processadores (até 128 CPUs)

O diagrama unifilar simplifica a compreensão e edição de diagramas para estudos de EMT muito grandes. O Hypersim, também, fornece uma interface para o ambiente Simulink® através do Simulink Coder™ (antigo Real-Time Workshop®), o gerador de código de Simulink.

Para sistemas de potência com mais de 1.000 barramentos, pode tornar-se difícil obter desempenho, em tempo real, utilizando simulações em EMT. Assim, uma simulação, em tempo real, TS, tal como realizado no *ePHASORSim*, é a preferida. Este tipo de algoritmo geralmente usa passo de integração da ordem de 1-10 milissegundos e é principalmente projetado para estudar as trocas de potência, em baixa frequência, entre as máquinas, compensador e carga, em regime permanente ou durante falhas.

Com um sistema desta dimensão, o gerenciamento dos dados pode tornar-se crítico. Uma entrada errada de dados, é muito difícil de detectar; assim sendo, é preferível que a entrada de dados seja feita em texto tabulado. Por exemplo, em dispositivos como transformadores, representados em valores p.u. no formato tabulado, pode-se detectar mais facilmente um dado que esteja fora da faixa de entrada em p.u..

Por outro lado, muitas vezes é necessário modelar dispositivos de comutação ultra-rápida (conversores de IGBT, PWM) utilizando alta resolução, com algoritmos especialmente codificados em FPGAs como no *eFPGAsim*.

### Simulação Híbrida

O acoplamento entre diferentes algoritmos é possível para atender a diferentes objetivos, ou seja:

- a. simulação híbrida EMT-TS [22] [26]: pode ser necessária quando se quer estudar uma parte da rede em detalhe utilizando simulação EMT considerando, ao mesmo, a interação com uma rede muito maior e que é simulada utilizando uma algoritmo para TS .
- b. Simulação híbrida EMT-FPGA: está implementado no eMEGAsim ou simulador especializado de 'motor-HIL' [4] onde conversores alta frequência/motores são simulados em FPGAs e são acoplados com outros sistemas elétricos que estão sendo executados na CPUs do simulador.

### 3.0 - ALGORITIMOS DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

Aqui, alguns algoritmos serão explicados com mais profundidade. Basicamente, existem dois tipos principais de métodos de solução para a simulação, em tempo real, de sistemas de potência: simulação de Transitórios Eletromagnéticos (EMT) e simulação de Transitórios (TS), tendo muitas variações, que serão descritas a seguir.

#### 3.1 Algoritmo Nodal (Tipo EMT)

Em um algoritmo típico de simulação EMT, cada elemento da rede é substituído por um circuito equivalente que consiste em condutâncias e fontes de corrente [8]. O próximo passo para este algoritmo de simulação EMT é estabelecer as equações nodais da rede equivalente:

$$[G][v(t)] = [i(t)] - [I] \quad (1)$$

onde a matriz  $[G]$  representa a condutância nodal,  $[v(t)]$  é vetor de tensão nodal,  $[i(t)]$  é o vetor de fontes de corrente injetada e  $[I]$  é de vetor corrente conhecida. Os elementos de  $[G]$  e  $[I]$ , em (1) dependem diretamente dos componentes do sistema de potência (indutância, capacitância, linhas de transmissão), bem como o método numérico (p. e. trapezoidal) escolhido para discretizar as equações diferenciais do comportamento dos elementos. O EMTP e EMTP-RV são o arquétipo de algoritmos para simulação EMT e têm sido amplamente utilizados há décadas nos simuladores em tempo real, tais como o Hypersim e RTDS [25]

##### 3.1.1.. Algoritmo EMT do Hypersim

O algoritmo EMT do Hypersim é diretamente derivado do algoritmo EMTP original; Ele calcula suas equações diretamente da discretização dos ramos RLC e constroi a equação das admitâncias nodais globais a partir daí. Utiliza como método de integração o trapezoidal e ordenação ótima dos nós em relação aos interruptores[10].

##### 3.1.2 Algoritmo EMT do Simulador RTDS

O simulador RTDS, da RTDS Technologies, utiliza um método nodal clássico e baseia-se no conceito do EMTP original, com método de Choleski, para resolver o problema da matriz admitância nodal. O método de Choleski é uma variação do método LU em que  $U = L^T$ , e tem a vantagem de otimizar a utilização da memória.

#### 3.2 Algoritmos baseados em Equações de Estado

Este algoritmo é baseado na descrição de estado do sistema de potência a ser simulado. É utilizado no Blockset SimPowerSystems para o Simulink da MathWorks®. No entanto, os algoritmos nativos do Blockset SimPowerSystems não são projetados para simulações em tempo real. Os algoritmos ARTEMiS utilizados no simulador eMEGAsim da Opal-RT são projetados para esse fim no Simulink/ Blockset SimPowerSystems™ e substituem algoritmos nativos do Blockset SimPowerSystems™ no Simulink com 2 tipos de algoritmos:

- a. Algoritmos de estado com pré-cálculo de todos os conjuntos de matriz devido às chaves de comutação;
- b. Algoritmo de estado nodal (SSN) [2], que será descrito na próxima seção.

Os algoritmos ARTEMiS são projetados para aproveitar as oportunidades de paralelização de cálculo. Vêm com modelos de linha de transmissão que permitem separar a solução das equações de estado em diferentes CPU/núcleos aproveitando o atraso de propagação natural das linhas. O algoritmo SSN, também, permite a paralelização direta, sem atraso, de circuitos totalmente concentrados e vem com avançados modelos de linha dependente da frequência: Domínio Modal [11] e domínio de Fase [12]. O algoritmo SSN, também, inclui métodos de interpolação para simulações de válvulas de tipo tiristor e de conversores com comutação forçada.

##### 3.3 Algoritmos ARTEMiS-SSN

SSN significa "State-Space-Nodal" e isso significa que o algoritmo SSN do ARTEMiS é um algoritmo híbrido, nodal, semelhante ao EMTP em muitas maneiras, onde as equações dos ramos RLC são substituídas por grupos generalizados descritos e discretizados por suas equações de estado.

Nos algoritmos utilizados no Blockset SimPowerSystems (Simulink da Mathworks) os sistemas de potência são descritos por equações de estado. A ideia fundamental do SSN é introduzir "nós" (no sentido utilizado pelo método

nodal EMTP) no sistema de equações e utilizando-os para introduzir dissociação virtual entre os grupos de SSN.

Estes grupos podem, então, ser descritos por sistemas locais de estados, incluindo o desacoplamento das chaves de comutação. Na Figura 2, a imposição de um nó com uma tensão desconhecida, à priori, cria uma separação virtual nas equações de estado, criando muitos zeros, em comparação com a equação de estado global, o que aumenta a velocidade de cálculos. Uma vez que cada grupo de SSN foi iterado, o ponto comum de solução  $v_{n+1}$  (nodal) é encontrado através de um método nodal com uma matriz nodal  $G$  e fontes históricas em  $i_{n+1} - I_n$  e computadas para todos os grupos.

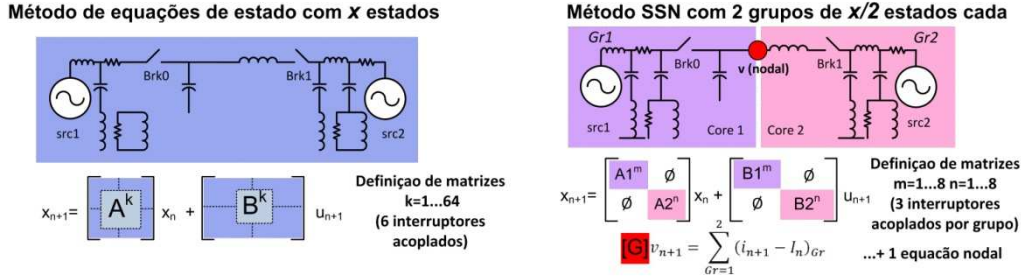


Figura 2- Separação virtual dos Grupos no SSN

### 3.3.1 Algoritmo ARTEMiS L-estável (L-stable)

ARTEMiS usa o estado de espaço (ABCD) equações de estado (ABCD) nos grupos SSN. É bem conhecido que a solução exacta para estas equações de estado é igual a:

$$x_{n+1} = e^{Ah} x_n + \int_t^{t+h} e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (2)$$

Em que  $h$  é o passo de discretização.

A abordagem tradicional EMTP utiliza a aproximação trapezoidal (Padé 1,1) da matriz exponencial igual:

$$e^{Ah} \cong \frac{I + hA/2}{I - hA/2} \quad (3)$$

Combinado com a interpolação linear da entrada durante o passo de integração. A regra trapezoidal é instável durante distúrbios rápidos, portanto, um método especial chamado CDA é aplicado. Durante os passos CDA do EMTP, o método de *Backward Euler* é usado para ambas as matrizes exponenciais e de dados de entrada, adicionalmente a mudança no passo de integração original da implementação [11]

Utilizar uma ordem superior na Equação (2) pode levar a resultados interessantes, especialmente no que diz respeito a questões de estabilidade, p.e., o algoritmo de resolução ARTEMiS 'art5', com base na aproximação (2,3) -Padé de 5ª ordem da matriz exponencial, e de fórmula geral igual:

$$e^{Ah} \cong \frac{I + 2hA/5 + (hA)^2/20}{I - 3hA/5 + 3(hA)^2/20 - (hA)^3/60} \quad (4)$$

tem uma propriedade chamada L-estabilidade, extensão da A-estabilidade, que traz imunidade a instabilidade numérica da regra trapezoidal. Nota-se que a regra de *Backward Euler* também é uma L-estável Padé aproximação.

### 3.3.2 Implementação em Tempo Real

**Fórmula L-estável:** é mais complexa de calcular que a fórmula trapezoidal, sendo usada somente dentro dos grupos SSN onde pré-cálculo é feito e, conseqüentemente, não afeta o desempenho em tempo real.

**Solução Nodal:** Como no Hypersim, SSN utiliza um método LU para resolver o problema algébrico da admitância nodal. Técnicas especiais são utilizadas para melhorar o desempenho, tais como as de ordenação ótimas [23] [24].

### 3.3.3 Algoritmo SSN paralelo multi-núcleos

Uma vantagem importante deste método SSN é que os grupos SSN são quase independentes um do outro e, conseqüentemente, as suas iterações podem ser realizadas simultaneamente em núcleos paralelos sem qualquer atraso artificial no algoritmo. A figura 3 mostra a forma como o algoritmo de SSN, é executado numa máquina de computação paralela composta de vários núcleos distintos.

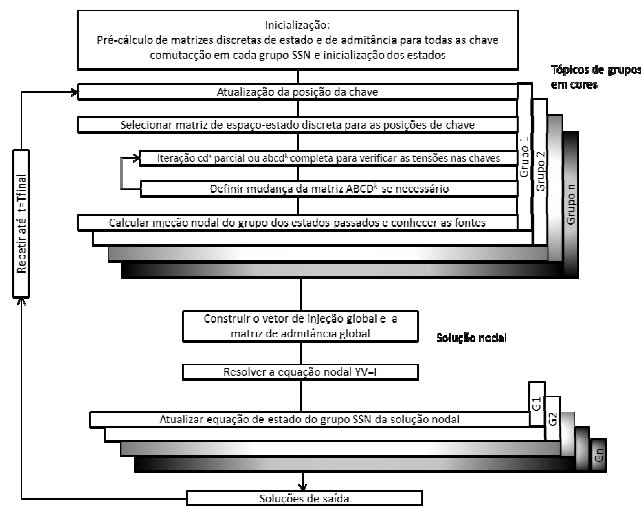


Figura 3- Algoritmo SSN paralelo

### 3.4 Algoritmos de Estabilidade Transitória

Do ponto de vista da teoria de sistemas, a estabilidade transitória de sistemas de potência (TS) é um problema fortemente não linear. Para avaliar, com precisão, deve ser descrito matematicamente por um conjunto de equações diferenciais algébricas (DAE) como se segue:

$$\dot{x}(t) = f(x, V) \quad (5)$$

$$YV = I(x, V) \quad (6)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (7)$$

Onde  $x$  é o vetor de variáveis de estado,  $V$  e  $I$  são os vetor de tensões e correntes no barramento, e  $Y$  representa a matriz das admitâncias nodais da rede, e  $x_0$  é o vetor que representa os valores iniciais das variáveis de estado. Para a simulação de estabilidade transitória da rede de transmissão, esta é modelada no domínio fasorial em torno da frequência principal e a dinâmica do sistema depende apenas de máquinas rotatórias e dos dispositivos de controle, tais como o sistema de excitação, estabilizador do sistema de potência, turbina e regulador de velocidade. Portanto, com um passo de integração para a simulação na ordem de alguns milissegundos a metade de um ciclo é suficiente. A equação (5) descreve o comportamento dinâmico do sistema, enquanto que a equação (6) descreve as restrições da rede (5).

Há vários algoritmos de TS na literatura, aqui, serão descritas duas abordagens implementadas no simulador em tempo real eMEGAsim de Opal-RT, ou seja, o relaxamento instantâneo (IR) e do Método Direto (DM).

O algoritmo para TS do eMEGAsim, ePHASORSim, foi projetado especificamente para simulação em tempo real de estabilidade transitória. Usa solução em domínio fasorial da sequência positiva dos sistemas de potência. Uma solução trifásica está sendo desenvolvida desde 2012. A biblioteca do ePHASORSim inclui a maioria dos componentes fundamentais necessários para a modelagem do sistema de potência: gerador síncrono, carga, sistema de excitação, sistema de alimentação de estabilizador, turbina e regulador de velocidade, transformadores de dois enrolamentos e linhas de transmissão. Este pacote de simulação pode ser usado para avaliação dinâmica dos sistemas de potência de larga escala, testando a funcionalidade do *hardware*: dispositivos de controle globais para grandes e a micro redes de energia, bem como para fins de formação acadêmica nos laboratórios ou para os operadores da indústria de alto nível. A ferramenta está relacionada com MATLAB/ Simulink da MathWorks e é compatível com os sistemas operacionais Linux e Windows.

O ePHASORSim envolve dois tipos de diferentes de algoritmos. O primeiro baseado no método de relaxamento instantâneo (IR) que pode distribuir e executar em núcleos paralelos de uma ou multi-CPU's, e o segundo é no método direto de solução de estabilidade transitória que funciona em um núcleo da CPU.

#### 3.4.1 Algoritmo de baseado no Método IR [18] [19]

Nesta abordagem, a rede elétrica está dividida (decomposta) em subsistemas menores que são resolvidos individualmente. No final de um passo de integração de cada subsistema é atualizado pelos subsistemas externos, e, em seguida, continua a simulação. Em cada um dos subsistemas as equações diferenciais são discretizadas com o método de integração trapezoidal e são usadas as iterações de *Newton-Raphson* para linearizar e resolver tais equações.

O método IR pode executar uma simulação em tempo real de um sistema em larga escala com de 7000 barramentos e 1800 geradores em dois 12-core *eMEGAsim target* a um passo de integração de 10 milissegundos.

#### 3.4.2 Algoritmo baseado no método direto (DM)

Devido a algumas limitações na escalabilidade e velocidade do método IR, aquele denominado "método direto" (DM) tem sido preferido, pois utiliza a integração explícita de Euler para discretizar as equações diferenciais, e as soluções das matrizes esparsas são exploradas de forma eficiente para fatorar e resolver equações nodais da rede.

O método direto presente no *ePHASORSim* pode simular sistemas na faixa de 20.000 barramentos mais rápido do que em tempo real. Consequentemente, esta técnica é muito bem adaptada para simulação em tempo real tipo HIL, necessária para os testes de sistemas controle global do sistema de potência e de proteção implementados em SCADA. Estudos vêm sendo realizados para simular sistemas ainda maiores em computadores em paralelo.

#### 3.4.3. Algoritmo de alta resolução em FPGA [1][4][5]

Muitas vezes é necessário simular dispositivos de eletrônica de potência com frequências de chaveamento elevadas, bem acima dos 10 kHz. Contudo, é difícil obter uma boa precisão da simulação na CPU, porque o tempo de amostragem é muito baixo, geralmente limitado acima 5 $\mu$ s, devido ao tempo de acesso à I/O. Além disso, os controladores modernos podem facilmente ter tempo de amostragem abaixo de 25 $\mu$ s, com *loops* correntes perto de 1  $\mu$ s tempo de amostragem, e, portanto, necessitam que a simulação HIL tenha uma latência na ordem do microssegundos, o que só pode ser conseguido com FPGAs hoje.

Por outro lado, as dificuldades de implantação de algoritmos in FPGA são frequentemente imensas. Por exemplo: é proibitivamente dispendioso, em termos de recursos, implementar um simples operador de divisão em FPGAs; como consequência, o método de resolução de sistemas lineares baseado na decomposição LU não pode ser facilmente utilizado em FPGAs.

Consequentemente, FPGAs favorecem a implementação de algoritmos simples, como inversores IGBT com motores PMSM, e conversores *boost* ou *buck-boost*. Os inversores em [4] foram implementados usando um método nodal com pre-cálculo da matriz nodal inversa, um truque para evitar a fatoração LU.

### 4.0 - DESEMPENHO DA SIMULAÇÃO

Nesta seção, descrever-se-ão alguns exemplos de redes de sistemas de potência simulados com os diferentes algoritmos descritos neste artigo.

#### 4.1. *ePHASORSim*

Foram realizadas a simulação de uma rede de potência de grande escala com cerca de 20.000 barramentos e 5.000 geradores, em tempo real, a um passo de integração de 10 ms fazendo uso do método direto (DM)[14]

Tabela 1 – Desempenho do *ePHASORSim* utilizando método direto em uma CPU de um núcleo

Números e Componentes				Fator de aceleração em tempo real
Barramento	Gerador	Controlador	Outros	
4992	1280	2304	9144	5
7020	1800	3240	12860	3,3
19968	5120	9216	36820	1,25

A Tabela 1 mostra o desempenho deste algoritmo em três casos teste de sistema de larga escala. A última coluna da tabela, lista em o fator de aceleração em tempo real de cada simulação, no *eMEGAsim*, em uma CPU Intel 3.3GHz. Um fator de aceleração maior que 1 significa que a simulação é mais rápida do que em tempo real.

#### 4.2. *Hypersim*

Em [21], a rede elétrica completa da província de Quebec, incluindo 25 usinas de energia eólica com base em DFIG, foi simulada em tempo real no *Hypersim*. A rede continha os seguintes elementos:

Tabela 2 – Elementos da rede

Números e Componentes						
Barramento 3 $\phi$	Gerador Hidroeletricos(turbina, AVR, estabilizador)	Usinas Eólicas	Condensadores		Linhas de Transmissão	Trafos 3 $\phi$ (modelagem para saturação)
			estáticos de VAR	síncronos		
643	34	25	97	6	167	150

O Hypersim usou 72 processadores de um super-computador SGI para fazer a simulação, em tempo real, da rede com um passo de integração de 50  $\mu$ S.

#### 4.3 *eMEGAsim* utilizando o algoritmo ARTEMiS- SSN

Em [13], um sistema HVDC bipolar com múltiplos bancos de filtros comutados foi simulado, em tempo real, com um passo de integração inferior a 50  $\mu$ S utilizando a paralelização do algoritmo ARTEMiS-SSN.

#### 4.4. *eFPGAsim*

Em [4], a simulação em tempo real de dois motores síncronos de ímã permanente baseado em elementos finitos é realizado com passo de integração de 150-500 nanosegundos sobre uma interface FPGA Virtex-6 com RT-LAB. O circuito completo, também, inclui um conversor PWM com uma frequência de comutação de até 50 kHz. Também é possível simular várias topologias elétricas definidas pelo usuário em FPGA usando o novo solver eHS do Opal-RT [27]. A tabela 3 resume o desempenho de vários algoritmos.

Tabela 3 – Desempenho de diferentes algoritmos

Tipo de solução	Tempo de etapa	# de CPU	# de barramentos	Pacote de simulação
TS (DM)	10 ms	1	20000	Ferramenta <i>eMEGAsim</i> Phasor
EMT	50 $\mu$ s	72	643	Hypersim
EMT	50 $\mu$ s	6	<100	<i>eMEGAsim</i> com ARTEMiS-SSN
EMT on FPGA	500 ns	FPGA	<10	<i>eMEGAsim</i> / <i>eFPGAsim</i>

## 5.0 - CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi mostrar exemplos de algoritmos de simulação de sistemas de potência EMT e TS e o seu desempenho em diferentes plataformas, tais como computadores multi-core e multi-processor utilizando o *eMEGAsim* ou computadores SGI multi-processadores com o Hypersim.

Para a simulação EMT de uma rede elétrica de até 1.000 barramentos trifásicos, o Hypersim é bem aderente, com grande capacidade nos computadores SGI paralelos juntamente com editor de modelos de alta qualidade e a possibilidade de alocação automática de tarefas. A alocação automática de tarefas é importante no Hypersim, o que permite a simulação, envolvendo mais de 100 processadores em paralelo.

A ferramenta *ePHASORsim* foi projetada para simular, de forma eficiente, os sistemas de potência na faixa de 20 mil barramentos e 5.000 geradores num único núcleo e em tempo real, utilizando a abordagem do método de direto (DM). Esforços de pesquisa estão sendo conduzidos para aumentar o tamanho do sistema, que possa ser simulado, em tempo real, utilizando computação paralela com a ferramenta fasorial e o método direto (DM). Um método semelhante ao de SSN está sendo desenvolvido na Opal-RT para fazer um programa de TS que utilize método direto e que seja executado em paralelo utilizando um computador multi-core.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) C. Dufour, T. Ould Bachir, L.-A. Grégoire, J. Bélanger, "Real-time Simulation of Power Electronic Systems and Devices" Chapter 15 of the book: "Dynamics and control of switched electronic systems: Advanced perspectives for modeling, simulation and control of power converters" Springer series on Advances in Industrial Control, Francesco Vasca and Luigi Iannelli (Eds.), Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-2885-4
- (2) C. Dufour, J. Mahseredjian, J. Bélanger, "A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 928-935, April 2011.
- (3) C. Dufour, S. Abourida, J. Bélanger, "InfiniBand-based real-time simulation of HVDC, STATCOM and SVC devices with custom-off-the-shelf PCs and FPGAs," Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2025-2029, 2006
- (4) C. Dufour, S. Cense, T. Yamada, R. Imamura, J. Bélanger, "FPGA Permanent Magnet Synchronous Motor Floating-Point Models with Variable-DQ and Spatial Harmonic Finite-Element Analysis Solvers", 15th Int. Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012, Novi Sad, Serbia, Sept. 4-6, 2012
- (5) C. Dufour, J. Bélanger, V. Lapointe, "FPGA-based ultra-low latency HIL fault testing of a permanent magnet motor drive using RT-LAB-XSG", Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, SAGE Publications, Vol. 84, Issue 2/3, pp. 161-172, February/March 2008.
- (6) J. W. Bialek, "Why has it happened again? comparison between the UCTE blackout in 2006 and the blackouts of 2003," IEEE Proc. PowerTech, pp. 51-56, July 2007.

- (7) IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power System, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- (8) R. Diao, V. Vittal, N. Logic, "Design of a real-time security assessment tool for situational awareness enhancement in modern power systems," IEEE Trans. Power Systems, vol. 25, no. 2, pp. 957-965, May 2010.
- (9) V. Jalili-Marandi, V. Dinavahi, "Instantaneous relaxation-based real-time transient stability simulation," IEEE Trans. P.S., vol. 24, no. 3, pp. 1327-1336, August 2009.
- (10) H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, no. 4, pp. 388-399, Apr. 1969.
- (11) J. R. Marti, "Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, pp. 147-157, 1982.
- (12) A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi, "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables," IEEE Trans. P. D., vol. 14, No. 3, pp. 1032-1038, July 1999.
- (13) C. Dufour, L.-A. Grégoire, J. Bélanger, "Solvers for real-time simulation of bipolar thyristor-based HVDC and 180-cell HVDC modular multilevel converter for system interconnection and distributed energy integration," CIGRÉ conference proceedings, Brazil, April 2011.
- (14) C. Dufour, V. Jalili-Marandi, J. Bélanger, Laurence Snider, "Power System Simulation Algorithms for Parallel Computer Architectures", Proceedings 2012 PES General Meeting San Diego, USA, July 22-26, 2012.
- (15) M. La Scala, G. Sblendorio, A. Bose, J. Q. Wu, "Comparison of algorithms for transient stability simulations on shared and distributed memory multiprocessors," IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 4, pp. 2045-2050, May 1996.
- (16) F. L. Alvarado, "Parallel solution of transient problems by trapezoidal integration," IEEE Trans. Power Appar. and Syst., vol. PAS-98, no. 3, pp. 1080-1090, May/June 1979.
- (17) M. La Scala, R. Sbrizzai, F. Torelli, "A pipelined-in-time parallel algorithm for transient stability analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 2, pp. 715-722, May 1991.
- (18) M. L. Crow, M. Ilic, "The parallel implementation of the waveform relaxation method for transient stability simulations," IEEE Trans. P.E.S., vol. 5, no. 3, pp. 922-932, August 1990.
- (19) V. Jalili-Marandi, V. Dinavahi, "SIMD-based large-scale transient stability simulation on the graphics processing units," IEEE Trans. Power Systems, vol. 25, no. 3, pp. 1589-1599, August 2010.
- (20) B. Stott, "Power system dynamic response calculations," Proc. of IEEE, vol. 67, no. 2, pp. 219-241, July 1979.
- (21) R. Gagnon, G. Turmel, C. Larose, J. Brochu, G. Sybille, M. Fecteau, "Large-Scale Real-Time Simulation of Wind Power Plants into Hydro-Québec Power System", Proc. of the 9th International Workshop on Large-scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Plants, Quebec City, Québec, Canada, October 18-19, 2010
- (22) S. Abhyankar, A.J. Flueck, "An Implicitly-Coupled Solution Approach for Combined Electromechanical and Electromagnetic Transients Simulation", Proc. 2012 PES General Meeting San Diego, USA, July 22-26, 2012.
- (23) W.F. Tinney, W.S. Meyer, "Solution of large sparse systems by ordered triangular factorization", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 18, No. 4 pp. 333 - 346
- (24) A. Gomez, L.G. Franquelo, "An Efficient Ordering Algorithm to Improve Sparse Vector Methods," IEEE Transactions on Power System, vol. 3, no. 4, November 1988, pp. 1538-1544.
- (25) T. Maguire, "The Implementation of the Cholesky Factorization Routine in the RTDS Real Time Network Solution", Proc. of ICDS '99, Vasteras, Sweden, May 1999
- (26) V. Jalili-Marandi, V. Dinavahi, K. Strunz, J. A. Martinez, A. Ramirez, "Interfacing techniques for transient stability and electromagnetic transient programs", IEEE Tran. P. D., vol. 24, no. 4, October 2009, pp. 2385-2395.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Christian Dufour** obteve um Ph.D. na Universidade Laval, Quebec, Canadá, em 2000. Ingressou na Opal-RT Technologies em 1999, onde ele é o principal pesquisador na área de ferramentas de simulação do sistema elétrico. Antes de ingressar na Opal-RT, ele trabalhou no desenvolvimento do Hypersim, simulador em tempo real, da Hydro-Quebec, bem como no Blockset SimPowerSystems da Mathworks. Seus interesses de pesquisa atuais estão relacionados com soluções algorítmicas para a simulação em tempo real de sistemas de potência e acionamentos de motores em RT-LAB, a plataforma em tempo real da Opal-RT Technologies

**Simone Araujo** Obteve seu M.Sc em 1994 na Universidade Federal de Uberlândia. Trabalhou como professor assistente na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação de 1996 a 2009, como pesquisador na Matrix Engenharia de 2005- 2012 e como responsável pela área de energia na Opencadd Advanced Technology de 2012-2013. É diretora de Inovação da TAG Inovação Tecnológica. Seus interesses atuais são na aplicação de ferramentas de simulação em tempo real para sistemas de potência que permitam a integração de fontes alternativas de energia, estudos de qualidade da energia.