

Garantindo a eficiência energética em aplicações de qualidade da energia elétrica em smart grids através de um framework baseado em redes de atuadores e sensores sem fio

Igor Leão dos Santos¹, Luci Pirmez¹, Flavia C. Delicato¹, Luiz Fernando Rust²,
Davidson R. Boccardo²

¹Programa de Pós-Graduação em Informática – Instituto Tércio Pacitti / Instituto de Matemática – Universidade Federal do Rio de Janeiro – 21.941-901 – Rio de Janeiro

²Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Av. N. S. das Graças, 50 – 25.250-020 – Xerém – Duque de Caxias – Rio de Janeiro

{igorlsantos, luci.pirmez, fdelicato}@gmail.com, {drboccardo, lfrust}@inmetro.gov.br

Abstract. *This paper presents a framework whose goal is to increase the energy efficiency of smart grids applications, focusing on the domains of Condition Monitoring Systems (CMS) and Power Quality (PQ). The key idea is the adoption of a Wireless Sensors and Actuators Network (WSAN), based on the concepts of data fusion and cooperation. A partial evaluation of the framework was carried out focusing on an application of the PQ domain. Experiments demonstrated the effectiveness of the framework in increasing the energy efficiency of the PQ application and quantified its overhead in terms of the WSAN computational resources, energy and communication.*

Resumo. *Este trabalho apresenta um framework cujo objetivo é elevar a eficiência energética de aplicações em smart grids, com foco em aplicações dos domínios de Sistemas de Monitoramento da Condição (SMC) e de Qualidade da Energia Elétrica (QEE). A ideia chave consiste na adoção de uma Rede de Atuadores e Sensores sem Fio (RASSF), baseada nos conceitos de fusão de dados e cooperação. Uma avaliação parcial do framework foi realizada com foco apenas sobre uma aplicação de QEE. Experimentos demonstraram a eficácia do framework na elevação da eficiência energética da aplicação de QEE e quantificaram seu overhead em termos de recursos computacionais, de energia e comunicação da RASSF.*

1. Introdução

No suporte à formulação de estratégias para aumentar a eficiência energética, as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) desempenham papel vital. Segundo [Corrêa & Corrêa 2009], define-se eficiência como a medida do quão economicamente os recursos de uma organização são utilizados para promover suas atividades fim. A eficiência energética surge quando este conceito é aplicado no sistema elétrico e trata a questão dos desperdícios de energia oriundos desses sistemas. Nesse contexto, a recente evolução das TIC viabilizou os *smart grids* [NIST 2012]. *Smart grids* adotam as TIC para prever e responder ao comportamento do sistema elétrico de forma inteligente, e representam o elemento principal para o desenvolvimento das cidades inteligentes baseadas na proteção ambiental, eficiência energética e sustentabilidade. Nas cidades inteligentes, a rede elétrica é automatizada, as fontes renováveis são integradas ao

sistema, o cliente pode produzir sua própria energia e veículos elétricos tornam-se alternativas viáveis para o transporte. Dessa forma, o consumo consciente de energia e a redução das emissões de gases poluentes fazem parte do cotidiano da sociedade. Entretanto, para prover esses benefícios às cidades inteligentes, é necessário vencer uma série de desafios na própria concepção dos *smart grids*. Um desafio chave é o desenvolvimento de soluções que buscam aumentar a eficiência energética nos domínios de geração e transmissão de energia, aqui abordado a partir de duas frentes.

A primeira frente trata do aspecto da redução de desperdícios de energia com foco nas propriedades elétricas em si. As ocorrências de distúrbios nas propriedades elétricas, denominados distúrbios na *Qualidade da Energia Elétrica* (QEE), são críticas e geram desperdícios [Muscas et al. 2010]. No contexto dessa frente, o desafio deste trabalho se traduz na proposta de soluções para monitorar propriedades elétricas que permitam isolar as regiões da rede elétrica causadoras dos distúrbios, aumentando a eficiência energética ao retornar as propriedades elétricas ao padrão da agência reguladora. A outra frente trata da gestão da integridade física (saúde) da infraestrutura de geração e transmissão de energia. Nessa frente, uma solução para aumentar a eficiência energética pode ser obtida ao reduzir as horas durante as quais os equipamentos envolvidos permaneceriam parados por quebra ou manutenção (*downtime*). Nesse contexto, o desafio deste trabalho se traduz no desenvolvimento de soluções para monitorar variáveis mecânicas e estruturais dos equipamentos que permitam avaliar seus estados de saúde. Sistemas desenvolvidos para apoiar essa função, denominados *Sistemas de Monitoramento da Condição* (SMCs) [Hameed et al. 2009], contribuem para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva que reduzem o *downtime*, elevando a eficiência energética.

Pelo exposto, torna-se evidente a necessidade de monitorar variáveis estruturais e elétricas no sistema elétrico. Tradicionalmente, esse monitoramento é realizado por redes de sensores cabeadas, nas quais dispositivos sensores coletam e encaminham dados para uma estação central, onde operadores humanos decidem as ações a tomar. Porém, esses sistemas tradicionais possuem alto custo de instalação e manutenção devido à presença de cabos [Gungor et al. 2010]. Uma abordagem alternativa é o uso de sistemas compostos por sensores inteligentes, que são dispositivos providos de recursos de processamento, armazenamento, sensoriamento, atuação e comunicação sem fio, capazes de monitorar variáveis cooperativamente. A capacidade de comunicação sem fio permite que os sensores sejam agrupados e deem origem a uma Rede de Atuadores e Sensores Sem Fio (RASSF) [Akyildiz et al. 2007].

Flexibilidade e baixo custo de instalação, manutenção e adaptação são benefícios das RASSF. Os dados adquiridos pelos sensores podem ser processados e interpretados localmente e/ou enviados para um ou mais nós sorvedouros, que não possuem as restrições de recursos computacionais, de energia e comunicação dos nós sensores. Nós sorvedouro funcionam como pontos de entrada para requisições das aplicações e pontos de coleta dos dados enviados pelos sensores. As RASSF incluem nós atuadores que são capazes de tomar decisões e executar ações no ambiente físico em resposta a situações interpretadas pelos sensores. Contudo, a adoção das RASSF deve atender a uma série de requisitos. Um requisito é que os nós da RASSF sejam operados por baterias e, portanto, a concepção de protocolos para estas redes deve prever o uso eficiente destas. Outro requisito é que as decisões tomadas dentro da rede sejam acuradas, e para tal é necessário que nós sensores individuais compartilhem seus dados

coletados localmente entre os demais nós para obter uma visão global durante o processo de decisão. A adoção de protocolos baseados na fusão de dados e na cooperação entre nós sensores é uma solução viável para atender a esses requisitos [Dos Santos et al. 2010].

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é propor um "Framework de Suporte à Eficiência Energética" (FraSEE), capaz de elevar a eficiência energética de aplicações de SMC e QEE nos domínios de geração e transmissão de *smart grids*, fazendo uso de uma RASSF. O FraSEE é considerado **eficaz** pois busca eliminar desperdícios em *smart grids*, elevando a eficiência energética das aplicações, enquanto o **overhead** gerado pelo FraSEE em termos de recursos computacionais e de energia satisfaz as restrições de recursos dos nós das RASSF. Como avaliações sobre as aplicações de SMC no domínio de geração já foram realizadas em trabalhos anteriores [Dos Santos et al. 2010] [Lemos et al. 2011] [Alves 2012], o presente trabalho foca em quantificar a eficácia e o *overhead* em termos de recursos computacionais e de energia do FraSEE voltado para uma aplicação de QEE no domínio da transmissão. O restante do trabalho é organizado como segue: trabalhos relacionados (seção 2), descrição do FraSEE (seção 3), estudo de caso (seção 4), resultados e discussões (seção 5) e conclusões (seção 6).

2. Trabalhos relacionados

Em [Ambikairajah et al. 2010] os autores propõem uma técnica baseada no uso conjunto da *Fast Fourier Transform* (FFT) e *Wavelet Transform* (WT) para avaliar condições de isolamento de cabos de alta tensão. Caso o isolamento elétrico nestes cabos esteja degradado, a tensão observada pode apresentar desvios prejudiciais ao sistema elétrico. O trabalho adota sensores cabeados com capacidade localizada de processamento para monitorar estes desvios, sendo aplicado ao domínio da transmissão (em subestações). Em [Hung et al. 2010] é proposto um sistema centralizado de monitoramento de *Overhead Transmission Lines* (OHTLs) utilizando nós sensores sem fio. No trabalho citado, a solução adotada para amenizar as desvantagens em termos de atraso de comunicação da topologia linear do sistema (imposta pelas OHTL) foi utilizar o suporte de uma rede celular auxiliar, para realizar a comunicação entre os nós sensores e o sorvedouro. Em [Liu et al. 2011] é proposta uma técnica descentralizada de localização de falhas nos cabos de transmissão de alta tensão das OHTLs. A técnica consiste na instalação de sensores cabeados de alta frequência espaçados ao longo dos cabos que detectam as ondas de corrente e tensão presentes no cabo.

O FraSEE se difere do trabalho de [Hung et al. 2010] (abordagem centralizada) e do trabalho de [Ambikairajah et al. 2010] (abordagem parcialmente descentralizada), por adotar uma abordagem completamente descentralizada, com todo o processamento e decisão realizados dentro da rede. O FraSEE tira proveito da capacidade localizada de processamento dos nós sensores sem fio para realizar a fusão de dados, reduzindo a necessidade de transmissões da rede (consequentemente fazendo melhor uso das baterias dos sensores) e contribuindo para a redução do atraso de comunicação decorrente da topologia linear. Na topologia do FraSEE, nós atuadores localizados próximos às linhas de transmissão podem ser acionados para executar ações de controle ainda dentro da rede e evitar problemas maiores, sem a necessidade de fazer a informação viajar até um sorvedouro no centro de controle da rede elétrica para ser analisada, dessa forma contribuindo para decisões mais rápidas do que nos trabalhos de abordagens centralizadas. Ainda sobre o aspecto da descentralização, o FraSEE se

assemelha ao trabalho de [Liu et al. 2011], pois ambos se baseiam em estratégias descentralizadas de monitoramento, isto é, os sensores dispostos sobre a OHTL monitorada têm uma visão da falha baseada em suas medições locais, pois realizam todo o processamento dentro da rede e podem tomar decisões ainda dentro da rede. Porém o FraSEE se diferencia do trabalho de [Liu et al. 2011], assim como de todos os trabalhos citados anteriormente, por adotar a cooperação dentro da rede antes de tomar uma decisão final. A cooperação permite que, mesmo sob a topologia linear, os nós sensores próximos troquem informações entre si sobre suas visões locais, para tomarem decisões mais acuradas em relação às que seriam tomadas com base apenas na visão local de cada nó. Sob outro aspecto, por adotar RASSFs o FraSEE se diferencia do trabalho de [Liu et al. 2011], e também do trabalho de [Ambikairajah et al. 2010] que usam redes de sensores cabeadas, ao passo que se assemelha aos trabalhos de [Hung et al. 2010], [Nasipuri et al. 2010] e [Yang 2011], que adotam tecnologias de sensoriamento sem fio, o possui as diversas vantagens e requisitos já citados. Em suma, o FraSEE se diferencia de todos os trabalhos citados por adotar RASSFs e por seu mecanismo de decisão ser implementado de forma completamente descentralizada e cooperativa. Esse conjunto de características permite ao FraSEE obter as vantagens (i) das RASSFs (flexibilidade e baixo custo de instalação, manutenção e adaptação), (ii) da descentralização (menor consumo de recursos computacionais, de energia e comunicação, já que cada nó processa e reduz localmente seus dados) e (iii) da cooperação (decisões tomadas mais acuradas do que as baseadas somente em decisões locais).

3. Descrição do FraSEE

A arquitetura lógica do FraSEE consiste de nove componentes, dois subsistemas e quatro bases de dados (Figura 1). A **BDInfoContexto** é uma base de dados onde são armazenados por aplicação (*id_aplicação*) os dados coletados das *variáveis de contexto* no formato $\{id_aplicação; id_var_contexto, valor; momento_obtenção; limiar_inf; limiar_sup\}$. Uma questão importante é que em [Lemos et al. 2011] e [Alves 2012] foi comprovado que ao considerar a influência das condições ambientais sobre os dados monitorados, um sistema de detecções/predições tornar-se mais acurado em relação aos que não consideram essa influência. Nesse sentido, o FraSEE adota a ciência de contexto [Springer et al. 2006] como uma alternativa para tornar as aplicações de SMC e QEE mais acuradas. Ao considerar a influência das condições ambientais, o FraSEE é capaz de eliminar essa influência e analisar dados que contribuem para detecções/predições mais precisas. No presente trabalho, as *variáveis de contexto* são variáveis ambientais como a temperatura, que influenciam as *variáveis de interesse* das aplicações, as quais podem ser a aceleração ou as frequências naturais de vibração (aplicações de SMC) ou a corrente elétrica e temperatura de um condutor (aplicações de QEE). A **BDInfoContexto** armazena também os limiares inferior e superior das variáveis de contexto por aplicação. A **BDAquisição** é uma base de dados que armazena e disponibiliza os dados brutos, no formato $\{id_tipo_sensor; valor; momento_obtenção\}$. A **BDCaracterísticas** é uma base de dados que armazena características extraídas dos dados brutos, no formato $\{id_aplicação; id_característica; valor; momento_obtenção\}$. Características são valores resultantes do emprego de alguma técnica de fusão de dados brutos [Dos Santos et al. 2010]. As técnicas de fusão de dados permitem reduzir a quantidade de dados sobre os quais as aplicações de SMC e QEE vão realizar suas análises e tomar decisões. Essas técnicas de fusão de dados englobam desde técnicas complexas de processamento de sinais (como a FFT e ajustes

de curva para extração de propriedades do seu espectro resultante) até simples cálculos de média e desvio-padrão. Exemplos de características resultantes do emprego dessas técnicas são as propriedades do espectro da FFT, a média e o desvio padrão. Na base de dados **BDAçõesControle** são armazenadas as regras utilizadas para acionamento dos atuadores. Cada regra assume o seguinte formato: SE (*condições*) ENTÃO *id_ação* (*parâmetros*), e está associada a uma aplicação. Cada uma das condições deve associar uma característica e um valor. O *id_ação* identifica a ação a ser tomada no atuador. Um exemplo de regra seria: SE *maior temperatura do condutor encontrada na linha de transmissão* > 70°C ENTÃO *alterar valor de corrente elétrica na linha para 100A*.

O **CGestorFraSEE** é o componente principal da arquitetura e é responsável por (i) realizar a *etapa de inicialização* da RASSF, e (ii) coordenar a ação dos outros componentes durante a *etapa de operação* do sistema (Seção 3.1). O **CGestorRASSF** age como a interface (*gateway*) entre a RASSF e a rede externa. Este componente é utilizado para monitorar a operação do FraSEE para fins de manutenção ou auditoria. O **CGestorAtuação** é responsável por acionar o dispositivo mecânico que atuará diretamente na estrutura. **CGestorAquisição** é responsável por gerir todos os processos de aquisição de dados brutos na rede e disponibilizar os dados coletados em **BDAquisição**. O **CGestorContexto** é responsável por atualizar os valores das *variáveis de contexto* e os disponibilizar em **BDInfoContexto**. O **CGestorFiltro** é responsável por filtrar, ou seja, realizar correções nas variáveis de interesse, caso seja detectada uma mudança de contexto. O **CGestorTratamento** implementa técnicas de fusão de dados para cálculo dos valores das características, que serão armazenadas em **BDCaracterísticas**.

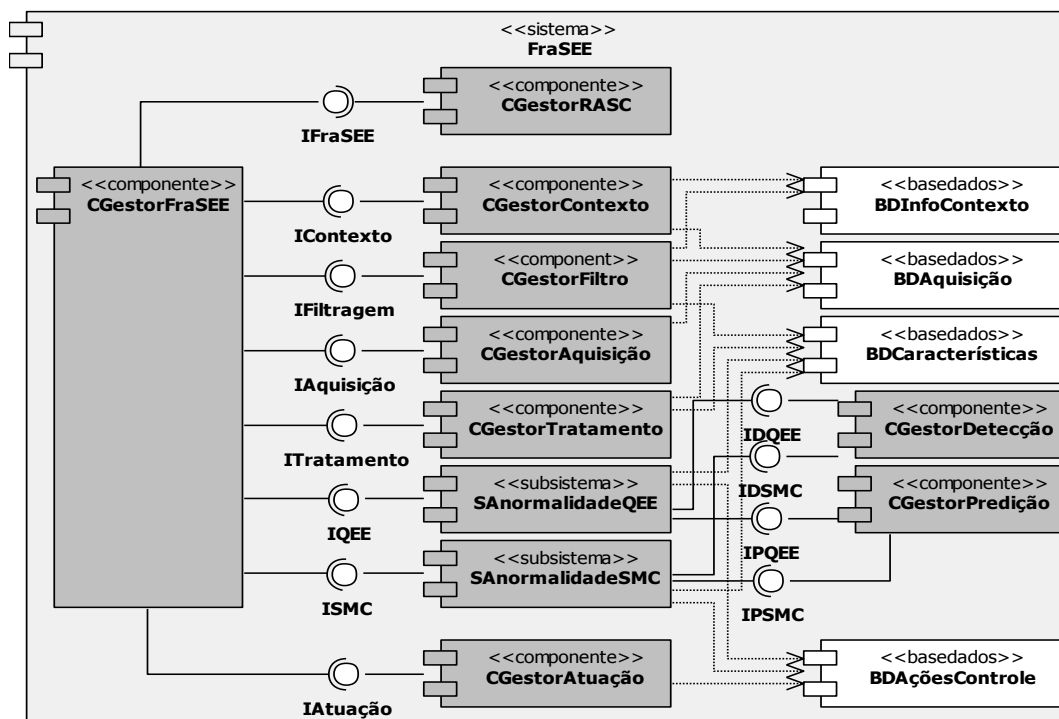


Figura 1. Diagrama de componentes da arquitetura lógica do FraSEE

O **SAnormalidadeQEE** e o **SAnormalidadeSMC** são subsistemas responsáveis por implementar métodos para detectar variações nas características e, de acordo com tais variações, determinar qual mecanismo de detecção ou predição presentes em

CGestorDetecção e **CGestorPredição** deve ser acionado, de acordo com os requisitos de cada aplicação de SMC e QEE. Os mecanismos presentes em **CGestorDetecção** e **CGestorPredição** são respectivamente inspirados no sistema de SMC de [Lemos et al. 2011] e no sistema de [Alves 2012], e exploram a capacidade de cooperação dos nós sensores e também técnicas de fusão de dados para obter melhores resultados de detecção/predição. Por fim, os nós sensores implementam todos os componentes e bases de dados da arquitetura com exceção de **CGestorRASSF**, **CGestorAtuação** e **BDAçõesControle**. Os nós atuadores implementam apenas **CGestorAtuação** e **BDAçõesControle**. Os nós sorvedouro recebem dados dos outros nós da rede e rodam apenas o componente **CGestorRASSF**.

3.1. Funcionamento do FraSEE: etapas de inicialização e operação

A etapa de inicialização do FraSEE segue o modelo descrito em [Dos Santos et al. 2010] e assume como pré-requisito que todos os nós da rede estejam instalados sobre a estrutura a ser monitorada, ligados, e sincronizados. O sincronismo deve ser mantido durante toda a execução do sistema e deve ser realizada uma nova sincronização antes de cada coleta de dados. Os procedimentos dessa etapa são: (i) configurações de hardware (modos de consumo de energia/resolução dos sensores); (ii) identificação dos vizinhos de cada nó da RASSF; (iii) configuração dos parâmetros iniciais do FraSEE, e de cada aplicação de SMC ou QEE; (iv) início da etapa de operação. O FraSEE opera periodicamente, e sua etapa de operação contém o *procedimento de contexto* e o *procedimento principal*, executados um após o outro.

O *procedimento de contexto* consiste na atualização dos valores das variáveis de contexto e se inicia, para uma dada variável de contexto, com uma requisição de atualização do valor dessa variável realizada pelo **CGestorContexto** ao **CGestorFraSEE** passando a identificação do sensor *id_tipo_sensor*. Ao receber a requisição, o **CGestorFraSEE** aciona o componente **CGestorAquisição** de forma que esse atualize **BDAquisição** com o valor da variável de contexto. Depois de efetuada a atualização, o **CGestorAquisição** informa ao **CGestorFraSEE**, que posteriormente informa ao **CGestorContexto** o término da requisição. O **CGestorContexto** então atualiza as informações de contexto em **BDInfoContexto**.

O *procedimento principal* consiste na atualização de características das aplicações, verificação de anormalidade e, caso seja identificada uma condição anormal, decisão pelos mecanismos de detecção/predição em **CGestorDetecção/CGestorPredição** e respectiva execução da ação de controle retornada por esses mecanismos. O **CGestorFraSEE** requisita a **SAnormalidadeQEE** ou **SAnormalidadeSMC** os N valores de *id_característica*, e procede à atualização delas. O restante desse procedimento se repete para cada uma das N características de interesse. **CGestorFraSEE** aciona **CGestorAquisição** que, de modo similar ao procedimento de contexto atualiza as respectivas entradas em **BDAquisição**. Nesse momento, caso seja solicitado pelas aplicações que necessitam da característica atual, **CGestorFraSEE** pode requisitar ao **CGestorFiltro** que realize uma correção dos dados adquiridos, de acordo com o contexto corrente. **CGestorFiltro** acessa **BDInfoContexto**, verifica se a variável de contexto atual está fora de seus limites e, em caso positivo, realiza a filtragem, armazenando o resultado filtrado em **BDAquisição**. Ao final da filtragem, o **CGestorFraSEE** aciona **CGestorTratamento**, passando o *id_característica* e *id_aplicação*. **CGestorTratamento** processa os dados e realiza a

extração de características. Para isso, **CGestorTratamento** utiliza os dados de **BDAquisição** como entrada e armazena ao fim da execução as características em **BDCaracterísticas**. **CGestorFiltro** pode ser acionado novamente após essa etapa para realizar a filtragem das características, de acordo com o contexto. Após a atualização de todas as características, **CGestorFraSEE** aciona **SAnormalidadeQEE** ou **SAnormalidadeSMC**, informando o término da atualização de características. Em seguida, o **SAnormalidadeQEE** ou **SAnormalidadeSMC** realiza seu procedimento de verificação de anormalidade. Neste procedimento são lidos os dados em **BDCaracterísticas** e é decidido se há alguma anormalidade em uma característica (definida pela aplicação). Se necessário, **SAnormalidadeQEE** ou **SAnormalidadeSMC** dispara, fornecendo o *id_mecanismo*, um dos mecanismos de decisão em **CGestorDetecção** ou **CGestorPredição** para diagnosticar de o estado da anormalidade. Em seguida, um *id_ação* é retornado por **CGestorDetecção** ou **CGestorPredição** a **SAnormalidadeQEE** ou **SAnormalidadeSMC**, além de possivelmente *logs* de execução, que são repassados ao **CGestorFraSEE**. O **CGestorFraSEE** aciona **CGestorAtuação** (que pode estar fisicamente instalado em outro nó da rede) transmitindo uma mensagem contendo *id_ação*, para que este realize a respectiva implementação de atuação no ambiente. Todos os *logs* são transmitidos por mensagens pelo **CGestorFraSEE** ao **CGestorRASSF**, instalado no nó sorvedouro, que os encaminha à rede externa.

4. Estudo de caso

Este estudo de caso visa apresentar um cenário de uma única aplicação de QEE no domínio da transmissão de energia elétrica. Atualmente, a temperatura de operação dos condutores em OHTLs (T_c), resultante principalmente da corrente elétrica presente no condutor (I_c) e influenciada por parâmetros ambientais como temperatura (T_a) e velocidade do vento (V_v), é estimada com base em um conjunto de “piores” condições ambientais possíveis, atingidas durante raros momentos no tempo [Bockarjova & Andersson 2007]. Isto é, durante a maior parte do tempo os condutores operam com uma grande sobra de capacidade de transmissão de energia elétrica por adotar um valor de I_c , que resultará em T_c muito abaixo do limite térmico de operação segura do condutor (LT_c). Valores de T_c acima de $LT_c = 70^\circ\text{C}$ representam um distúrbio de QEE que afeta negativamente a capacidade de transmissão de energia de um dado condutor. Em suma, por desconhecimento das condições ambientais, atualmente busca-se evitar com precaução exagerada o superaquecimento do condutor ($T_c > LT_c$).

Considera-se nesse estudo de caso, como em [Bockarjova & Andersson 2007], que sob condições ambientais padrão ($T_a = 10^\circ\text{C}$, $V_v = 0,6096\text{m/s}$), uma corrente padrão (I_c^*) = 580A é o maior valor suportado pelo condutor da OHTL. O valor I_c^* resulta em $T_c = LT_c = 70^\circ\text{C}$ e define a capacidade de transmissão de energia elétrica do condutor. Considera-se também que, sob um conjunto de piores condições ambientais ($T_a = 50^\circ\text{C}$, $V_v = 0\text{m/s}$), a OHTL opera constantemente com $I_c = 245\text{A}$. Como a Eficiência Energética (EE) é definida como sendo a relação $EE = (I_c/I_c^*)$, nessa configuração considerada demasiadamente precavida, a eficiência energética da OHTL resume-se a $245/580 = 42,24\%$. Ao desejar aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica do condutor (I_c), e consequentemente EE, deve-se estabelecer uma meta programada de I_c com valor maior que 245A. Constata-se que ao monitorar I_c , e os respectivos parâmetros ambientais (contexto), torna-se possível definir em tempo real e com maior precisão o valor de T_c . Esse maior controle sobre a variável T_c permite adotar maiores

valores de I_c sem extrapolar LT_c , resultando em uma melhor utilização da capacidade de transmissão de energia elétrica da linha, aumentando a eficiência energética da OHTL. O monitoramento de I_c e dos respectivos parâmetros ambientais pode ser realizado pela aplicação de QEE, cujo objetivo é detectar se T_c , calculada em um ponto da OHTL e em um dado momento no tempo, ultrapassou LT_c . Os demais parâmetros dos condutores dessa OHTL, bem como a quantificação das influências de I_c e de cada parâmetro ambiental sobre T_c , são detalhados em [Bockarjova & Andersson 2007].

Quanto às limitações do estudo de caso, em virtude da indisponibilidade de um condutor de uma OHTL real, optou-se por simular *offline* o comportamento das variáveis sensoriadas ao longo da OHTL e inserir os valores em uma base de dados não pertencente ao FraSEE. Essa base de dados, implantada em cada sensor, é populada com os valores de cada variável que devem ser lidos em cada momento no tempo pelo nó sensor, em uma dada posição. Para determinar esses valores, o comportamento de cada variável respeitou fórmulas retiradas da literatura. Os valores de T_a apresentados em cada ponto na linha obedecem a uma curva em função da hora do dia (t), retirada de [Seppa 1995]. De forma similar, os valores de V_v obtidos em cada ponto na linha são retirados de [Foss & Maraio 1990]. Por fim, o valor de I_c deve ser alterado pelo atuador ao final da execução de cada procedimento principal do FraSEE. Como não houve disponibilidade de atuadores reais capazes de alterar I_c , os nós sensores obtêm os novos valores de I_c via rede, enviados pelo nó atuador.

5. Experimentos

Em todos os experimentos realizados com o FraSEE, a RASSF foi composta por sensores da plataforma MICAz, que possuem 4kB de memória RAM, 128 kB de memória flash para armazenamento de programas e 512 kB para armazenamento de dados. Essa plataforma é alimentada por duas baterias AA (1,5V, 1500mAh) que fornecem aproximadamente 16 kJ de energia. O FraSEE foi implementado usando o TinyOS (versão 2.1.1) e a linguagem de programação NesC. Os experimentos simulados utilizaram o simulador Avrora.

Os experimentos com sensores reais foram efetuados no Laboratório de Redes da UFRJ. Com base na metodologia exposta no estudo de caso, a aquisição de dados é simulada pelos sensores: (i) um termômetro, capaz de medir T_a , (ii) um anemômetro, capaz de medir V_v , e (iii) um sensor de corrente elétrica (efeito Hall), capaz de medir I_c . Em todos os testes (reais e simulações), a distância entre dois nós sensores é igual a 20m, independente do número de nós na rede. Nos testes reais foi possível simular a cobertura completa da distância entre duas torres consecutivas (*span*) da OHTL de 500m [Bockarjova & Andersson 2007] com 25 nós. Os nós sensores da RASSF foram organizados fisicamente formando uma topologia em zigue-zague. Nessa topologia cada nó recebe seu `NODE_ID`, identificador único na rede, incrementado sucessivamente de uma unidade a partir do nó localizado na subestação, que apresenta `NODE_ID` = 0. O nó localizado na subestação desempenha papéis de atuador e também sorvedouro. Cada nó possui como vizinhos apenas os nós de `NODE_ID` sucessor (`NODE_ID`+1) e antecessor (`NODE_ID`-1) e apenas com estes é permitido se comunicar. Devido à topologia em zigue-zague, os nós de `NODE_ID`+2 e `NODE_ID`-2 se encontram a uma distância desprezível de qualquer nó em questão. Nessa versão do trabalho foi considerado apenas o modelo de falha para perda de pacotes. Assim, foi utilizada a interface *PacketAcknowledgements* do TinyOS 2.1.1 para gerenciar confirmações

simples de mensagens de forma a auxiliar a retransmissão em caso de perda. Por fim, todos os resultados apresentados representam uma média de 30 replicações para um intervalo de confiança de 95%.

5.1. Implementação do mecanismo de cooperação

Na aplicação de QEE, T_a e V_v são variáveis de contexto, e T_c é uma característica. Filtros baseados na relação citada na formulação do estudo de caso, entre T_c , T_a e V_v , foram implementados. O mecanismo de detecção consiste na avaliação cooperativa dos valores de T_c calculados localmente por cada nó sensor. Foi adotada uma técnica de fusão de dados que consiste em assumir o maior valor de T_c de toda a rede para definir a temperatura do condutor como um todo. Assim garante-se que em nenhum ponto o valor de T_c será extrapolado. O mecanismo de detecção inicia com cada nó sensor avaliando a regra simples: SE $T_c > LT_c$ ENTÃO *assumir detecção local*. Após todos os nós avaliarem essa regra, uma mensagem é transmitida por *multihop* desde o último nó (maior NODE_ID) até o primeiro (NODE_ID=0), contendo os campos *Contador* e *MaiorValor*. *Contador* acumula, a cada salto, o número de nós que detectaram $T_c > LT_c$. *MaiorValor* é atualizado com o valor local de T_c caso este seja maior que seu valor atual. Quando a mensagem enviada pelo último nó chega ao atuador, se *Contador*>0 aciona-se um alarme e, independente dessa condição, I_c é recalculado para a OHTL. I_c assume o valor que resulta em *MaiorValor* de T_c . A aplicação requisita que uma decisão seja tomada a cada 10 minutos, uma vez que uma alteração em I_c pode levar esse tempo (estimado com base em [Bockarjova & Andersson 2007]) para se manifestar em T_c ao longo de toda a OHTL. A atualização das variáveis de contexto é feita antes do cálculo de T_c .

5.2. Métricas

Considerando os objetivos do presente trabalho e seguindo a metodologia GQM [Basili et al. 1994], foram definidas duas metas: (i) analisar a eficácia do FraSEE, em termos de eliminação de desperdícios em *smart grids*, elevando a eficiência energética da aplicação de QEE e (ii) quantificar o *overhead* do FraSEE, em termos de consumo de recursos computacionais e de energia da RASSF. Essas metas foram refinadas em três questões. A questão Q1 relaciona-se com a meta (i), e as demais com a meta (ii). **Q1:** É possível atingir uma meta programada de EE a ser estabelecida de acordo com a demanda energética em um dado cenário real? **Q2:** O *overhead* de memória gerado pelo FraSEE é baixo o suficiente para que nós sensores típicos sejam capazes de comportar o FraSEE, implementações de protocolos e sistema operacional? **Q3:** Por quanto tempo uma RASSF pode durar executando o FraSEE, sistema operacional e protocolos? Por fim, são definidas métricas para embasar as respostas a essas perguntas.

Em relação a Q1 define-se a métrica Eficácia do FraSEE (EF) = (Meta Atingida/Meta Programada) [Corrêa & Corrêa 2009]. A Meta Atingida é o menor valor de I_c , potencialmente maior que I_c^* , que se torne possível praticar na OHTL ao adotar-se a aplicação de QEE suportada pelo FraSEE como solução. Em relação a Q2 são definidas duas métricas: Porcentagem de bytes ocupados em RAM (BR) e Porcentagem de bytes ocupados em memória Flash (BF). BR estabelece a relação entre a ocupação de RAM do programa implementado e o total de RAM disponível na plataforma MICAz. BF é definido similarmente para a memória Flash. Em relação a Q3, é usada a métrica Tempo de vida da rede (TVR), definida como o tempo decorrido desde que a RASSF é ligada até que esta não seja mais capaz de efetuar a função principal do FraSEE (isso

ocorre quando o primeiro nó da rede tem sua bateria esgotada e não pode mais se comunicar).

5.3. Resultados do experimento sobre a eficácia do FraSEE

Para responder Q1, foi realizado um experimento com 25 nós sensores reais (Figura 2). A Figura 2(a) mostra os valores de corrente elétrica regulados pelo FraSEE através do atuador ($I_{cFraSEE}$) em Ampères, pela hora do dia (eixo horizontal). O valor constante de 245A atualmente praticado (I_c), o valor respectivo à meta programada de eficiência energética (I_c Meta) e o valor I_c^* se encontram no gráfico para efeito de comparação. Nesse estudo de caso escolheu-se como I_c Meta o valor de 380A, pois de acordo com [EPE 2012], é razoável supor um crescimento da demanda energética de 4,5% ao ano no Brasil pela próxima década. Isso se traduz em termos da necessidade de aumento de I_c de modo a atingir $EE = 380/580 = 65,60\%$. As condições ambientais às quais a OHTL está sujeita a cada hora do dia, se encontram na Figura 2(b). Nessa Figura 2(b), o eixo vertical da direita mede a velocidade do vento, enquanto o da esquerda mede a temperatura. Na Figura 2(a) observa-se que é possível atingir valores de corrente elétrica próximos de I_c^* , e sempre acima de I_c e I_c Meta, durante todas as horas do dia. O menor valor de $I_{cFraSEE}$ (459A) foi obtido às 19 h, quando o ambiente atinge suas piores condições ao longo de todo o dia. Na Figura 2(b), constata-se que o ambiente apresenta temperatura de 37°C , próximo do pico (40°C), aumentando a temperatura do condutor, e apresenta velocidade do vento abaixo de 2 m/s, com menor potencial para resfriar o condutor. Assim, no pior caso (às 19h) foi atingido $EE = 79,14\%$, cujo valor é superior à meta programada de 65,60% de EE. Por fim, $EF = 79,14\%/65,60\% = 120,64\%$. Conclui-se então que a primeira meta foi atingida, uma vez que foram eliminados desperdícios em *smart grids* de modo a elevar a eficiência energética, atingindo uma eficácia EF superior a 100%, indicando que a meta de 65,60% foi superada em sua totalidade.

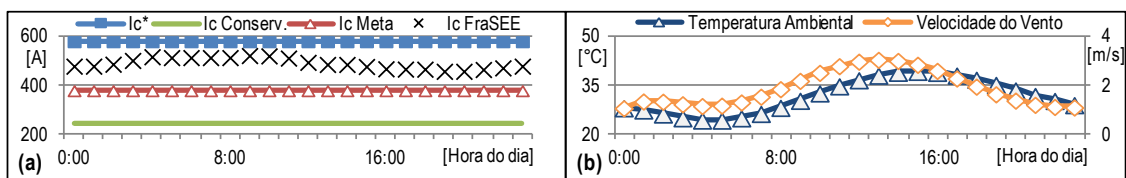


Figura 2. Análise da eficácia do FraSEE

5.4. Resultados dos experimentos sobre o overhead do FraSEE

Para responder Q2, foi realizado um experimento onde foi compilado o FraSEE excluindo-se cada componente e base de dados citados na arquitetura, um por vez. Como o estudo de caso envolve uma única aplicação de QEE que utiliza um mecanismo de detecção, os componentes **SAnormalidadeSMC** e **CGestorPredição** não foram implantados nos sensores. A compilação do FraSEE apresentou consumo de 1026 bytes em RAM e 25540 bytes em ROM (BR = 25,05% e BF = 19,49%). Respondendo a Q2, conclui-se que o *overhead* atribuído ao FraSEE, sistema operacional e protocolos em um nó sensor típico (MICAz) resulta em menos de 30% da memória do sensor ocupada.

Para responder Q3, quatro experimentos foram simulados (topologias de 25, 50, 75 e 100 nós) e em todos esses experimentos foram armazenados valores de consumo de energia retornados pelo simulador Avrora. Cada repetição dura o suficiente para realizar desde a etapa de inicialização até o recebimento de uma mensagem de colaboração. A

Figura 3(a) ilustra o consumo de energia (em Joules) por nó para a topologia de 25 nós. Nesse experimento o resultado de consumo de energia apresentou um valor similar (0,42J) para todos os nós da rede já que cada nó comunica-se apenas com o vizinho anterior e posterior, e que apenas uma mensagem é roteada do último nó ao primeiro durante uma simulação. Todos os nós coletam as mesmas quantidades de dados e transmitem o mesmo número de mensagens, exceto o ultimo nó. Os resultados obtidos em cada um dos outros três experimentos (topologias de 50, 75 e 100) para o consumo de energia por nó também foram similares (0,45J, 0,47J e 0,51J, respectivamente). Na Figura 3(b) é ilustrado o consumo médio por nó sensor da rede (em Joules) para as quatro topologias, onde se observa um aumento no consumo médio por nó sensor da rede com o aumento no número de nós da topologia. Isso se deve à necessidade de um maior número de saltos para a mensagem enviada pelo último nó chegar ao primeiro, aumentando o TAC. Na Figura 3(c) são apresentados os resultados de TVR (em dias) para cada uma das quatro topologias. O maior TVR (377 dias) foi obtido para a topologia de 25 nós, enquanto o menor (358 dias) foi obtido para a topologia de 100 nós. Respondendo Q3, conclui-se que o *overhead* em termos de consumo de energia atribuído ao FraSEE, para uma RASSF de 100 nós faz com que haja a necessidade de uma troca de baterias de toda a rede por ano, o que satisfaz a aplicação. Conclui-se então que a segunda meta que avalia o *overhead* em termos de consumo de recursos do FraSEE foi atingida.

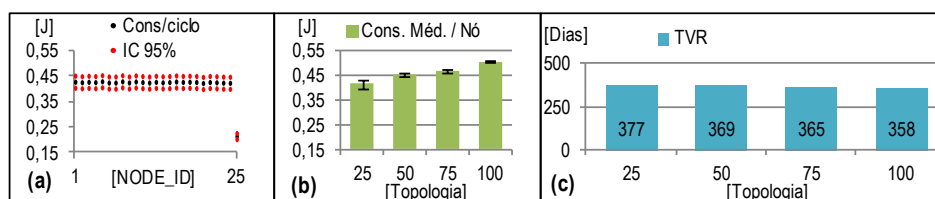


Figura 3. Análise do consumo de energia e tempo de vida da rede

6. Conclusões

O FraSEE se mostrou eficaz ao eliminar os desperdícios em uma OHTL apresentada em um estudo de caso, elevando a eficiência energética da aplicação de QEE. O *overhead* do FraSEE também foi medido em termos das restrições de recursos computacionais e de energia das RASSF. Nesse sentido, o FraSEE é apontado como uma potencial solução na superação do desafio de elevar a eficiência energética de aplicações em *smart grids*. Em trabalhos futuros, a mesma metodologia aplicada nesse trabalho deve ser aplicada para avaliação de outros estudos de caso, em que outras aplicações estarão presentes na RASSF, além da aplicação de QEE desse trabalho.

Agradecimentos

Esse trabalho é parcialmente financiado pelo CNPq (proc. 477223/2012-5, 473851/2012-1, 304941/2012-3, por Luci Pirmez; 311363/2011-3, 470586/2011-7, 557.128/2009-9 por Flavia C. Delicato); pela FINEP (proc. 01.10.0064.00 por Luci Pirmez); pela FAPERJ (proc. E-26/102.961/2012, E-26/170028/2008 por Flavia C. Delicato). Igor Leão dos Santos é bolsista de mestrado pela CAPES.

Referências

Akyildiz, I. et al. (2007) "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Comput Netw*, 51 (4) pp. 921–960.

- Alves, M. (2012) “Delphos: sistema de predição de danos para aerogeradores usando redes de sensores e atuadores sem fio”. Tese (Mestrado), PPGI/UFRJ, pp. 102.
- Ambikairajah, R. et al. (2010) “Smart sensors and online condition monitoring of high voltage cables for the smart grid”, MEPCON’10, Egito, 19-21 Dez., pp. 807-811.
- Basili, V. et al. (1994) “Goal, question metric paradigm”. Encyclopedia of Software Engineering, v. 1, JW&S.
- Bockarjova, M. et al. (2007) “Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy”. PowerTech, Lausanne, Suíça, 1-5 Jul., pp. 6.
- Corrêa, H. et al. (2009) “Administração de produção e operações”. 2ª Ed., Atlas: SP, Brasil.
- Dos Santos, I. et al. (2010) “Resource consumption analysis for a structural health monitoring algorithm using wireless sensor networks”. XXVIII SBRC, Gramado, Brasil, 24-28 Mai, SBC, pp. 263-276.
- EPE (2012) “Consumo nacional de eletricidade vai crescer 4,5% ao ano na próxima década”. Informe à imprensa, Rio de Janeiro, pp. 3.
- Foss, S. et al. (1990) “Dynamic line rating in the operating environment”. IEEE T Power Deliver, 5 (2) pp. 1095-1105.
- Gungor, V. et al. (2010) “Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid”. IEEE T Ind Electron 57 (10) pp. 3557-3564.
- Hameed, Z. et al. (2009) “Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms”. Renew Sust Energ Rev, 13 (1) pp. 1-39.
- Hung, K. et al. (2010) “On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems”. SmartGridComm, Maryland 4-6 Out pp. 309-314
- Lemos, E. et al. (2011) “Algoritmo distribuído para detecção de dano em aerogeradores utilizando redes de atuadores e sensores sem fio”. XXIX SBRC, Campo Grande, Brasil, 30/5 a 03/06, SBC, pp. 439-452.
- Liu, Y. et al. (2011) “Study on new method for distributed fault location of overhead transmission line”. Power & Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-8.
- Muscas, C. (2010) “Power quality monitoring in modern electric distribution systems”. IEEE Instru Meas Mag, 13 (5) pp. 19-27.
- NIST (2012) “NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards”. v 2.0 1108R2.
- Seppa, T. (1995) “Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real-time ratings”. IEEE T Power Deliver 10 (3) pp. 1460-1470.
- Springer, T. et al. (2006) “Middleware support for context-awareness in 4G”. WoWMoM, Buffalo, EUA, IEEE, pp. 203-211.