



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**Mecanismo de compressão de dados para medidores inteligentes em
um cenário de smart grid**

Douglas Lopes de Sousa Mendes

Teresina-PI, Abril de 2019

Douglas Lopes de Sousa Mendes

Mecanismo de compressão de dados para medidores inteligentes em um cenário de smart grid

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Teresina-PI

Abril de 2019

Douglas Lopes de Sousa Mendes

Mecanismo de compressão de dados para medidores inteligentes em um cenário de smart grid/ Douglas Lopes de Sousa Mendes. – Teresina-PI, Abril de 2019-
36 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Ricardo de Andrade Lira Rabêlo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Abril de 2019.

1. Ajuste de Curva. 2. Medidor Inteligente. 3. Redes Elétricas Inteligentes.

CDU 02:141:005.7

"Mecanismo de Compressão de Dados para Medidores Inteligentes em um cenário de Smart Grid"

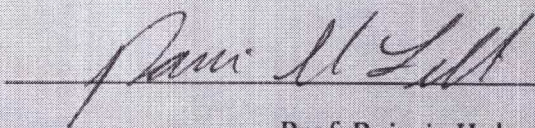
DOUGLAS LOPES DE SOUSA MENDES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

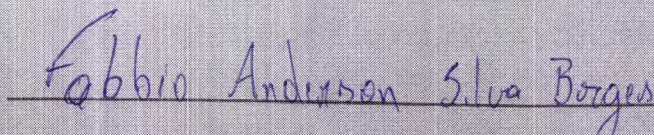
Aprovada por:



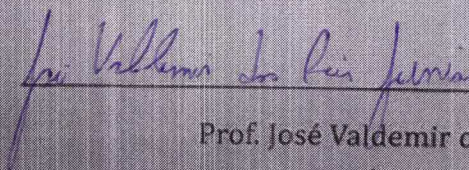
Prof. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof. Raimir Holanda Filho
(Examinador Externo à Instituição)



Prof. Fabbio Anderson Silva Borges
(Examinador Externo ao Programa)



Prof. José Valdemir dos Reis Júnior
(Examinador Interno)

Teresina, 12 de abril de 2019

*Aos meus pais Francisco das Chagas e Maria Natividade,
por todo o amor e carinho comigo em todos os momentos da minha vida.*

Agradecimentos

Agradeço à Deus pela saúde e energia para desenvolver este trabalho.

Agradeço aos meus pais Francisco das Chagas Lopes Mendes e Maria Natividade de Sousa Mendes, minha irmã Hercília Raquel de Sousa Mendes e demais familiares por sempre torcerem pela minha felicidade.

Aos meus amigos Ricardo de Andrade, Marvin Lemos e Carlos Giovanni pela paciência e por me guiarem nessa longa jornada que começou ainda na graduação.

Aos grandes amigos que fiz durante os bons momentos vividos em laboratórios (Opala, Labra e Oasis).

Aos amigos que torcem por mim, mesmo eu estando afastado deles por conta da distância ou dos compromissos.

À todos os professores que buscam compartilhar o melhor de si, para o crescimento profissional e pessoal de seus alunos, mesmo sob condições adversas.

*“Nós somos aquilo que repetidamente fazemos.
Excelência, portanto, não é um ato, mas um hábito.”
(Aristóteles)*

Resumo

As redes elétricas inteligentes apresentam uma nova arquitetura para o sistema elétrico de potência onde, aliadas a novas tecnologias de informação e comunicação, visam garantir o atendimento à demanda requerida assegurando a qualidade, disponibilidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Um dos principais componentes dessa nova arquitetura são os medidores inteligentes, equipamentos instalados junto aos consumidores, que possuem como função principal registrar informações relacionadas ao consumo de energia elétrica. Os dados coletados são transmitidos para a concessionária de energia por meio de uma infraestrutura de comunicação bidirecional e são extremamente valiosos para a concessionária, pois por meio deles é possível tarifar o consumidor, estimar o perfil de carga, detectar irregularidades, desenvolver novas políticas de tarifação, entre outros. No entanto, grande volume de dados trafegados pela rede em direção à concessionária pode ocasionar congestionamento na infraestrutura de comunicação, levando a perda de pacotes, aumento na latência, dentre outros problemas. Dessa forma, este trabalho propõe um mecanismo adaptativo de compressão de dados, baseado em ajuste de curvas, que é capaz de representar o perfil de consumo por meio de um modelo funcional. Tal mecanismo está embarcado no medidor inteligente e tem como objetivo reduzir a quantidade de dados enviados para a concessionária de energia elétrica. Para avaliar o mecanismo proposto foram utilizados dados de consumo para diferentes perfis, extraídos da ferramenta *Load Profile Generator* onde os parâmetros passíveis de ajuste (limiar de erro e capacidade de buffer) foram estudados sob diferentes configurações. Por utilizar ajuste de curva, o mecanismo proposto pode apresentar certo nível de imprecisão, o que pode prejudicar financeiramente o consumidor ou a concessionária de energia elétrica. Entretanto, com a inclusão de um limiar de erro associado ao mecanismo, pôde-se observar, por meio dos diversos experimentos realizados, que o nível de imprecisão se mantém sob controle, de modo que o impacto financeiro seja mínimo. Além disso, o custo associado à execução do mecanismo foi avaliado em um dispositivo com baixo poder computacional, bem como a viabilidade de integração do mecanismo proposto com outras funcionalidades presentes no cenário de gerenciamento pelo lado da demanda. Por fim, outro experimento analisou a aplicação de média móvel sob diferentes configurações para analisar a suavização de dados discrepante que possam prejudicar o funcionamento do mecanismo.

Palavras-chaves: Compressão de dados. Gerenciamento pelo lado da demanda. Medidor inteligente. *Testbed*.

Abstract

The smart grids present a new architecture for the electric power system where, together with new information and communication technologies, aim to guarantee the required demand, ensuring the quality, availability, and reliability of electric power supply. One of the main components of this new architecture is the smart meter, equipment installed next to the consumers, whose primary function is to register information related to the electric consumption. The data collected are transmitted to the utility through a two-way communication infrastructure and are extremely valuable to the concessionaire, as it is possible to charge the consumer, estimate the load profile, detect irregularities, develop new charging policies, among others. However, a large amount of data transmitted by the network to the concessionaire can cause congestion in the communication infrastructure, leading to packet loss, increased latency, and other problems. Thus, this work proposes an adaptive mechanism of data compression, based on curve fitting, which can represent the consumption profile through a functional model. Such a mechanism is embedded in the smart meter and aims to reduce the amount of data sent to the electrical utility. In order to evaluate the proposed mechanism, consumption data from different profiles, extracted from the Load Profile Generator tool, were submitted to the mechanism in order to evaluate the parameters susceptible to adjustment (error threshold and buffer capacity), analyzed under different configurations. By using curve fitting, the proposed mechanism may present a certain level of imprecision, which may be financially detrimental to the consumer or the utility. However, with the inclusion of an error threshold associated with the mechanism, it has been observed, through the various experiments carried out, that the financial impact provoked by imprecision is minimal. Also, an experiment evaluated the cost associated to the execution of the mechanism in hardware with low computational power, as well as the feasibility of integrating the proposed mechanism with other functionalities present in the demand side management scenario. Finally, another experiment analyzed the application of moving average under different configurations to analyze the smoothing of outliers that could impair the functioning of the mechanism.

Keywords: Data Compression. Demand Side Management. Smart Meter. Smart Grid. Testbed.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comparação entre ajuste linear e polinomial de grau 3.	12
Figura 2 – Funcionamento do mecanismo adaptativo de compressão de dados. . .	14
Figura 3 – Diferentes perfis de consumo.	17
Figura 4 – Temperatura média observada no Brasil (INMET, 2018)	18
Figura 5 – Raspberry Pi 3	22
Figura 6 – Infraestrutura de comunicação do AMI	23
Figura 7 – Perfil de consumo antes e depois da otimização sugerida pelo DR. . . .	25
Figura 8 – Infraestrutura de um DSM (Adaptado de (VERAS et al., 2018a)). . . .	26

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição dos diferentes perfis de consumidores	17
Tabela 2 – Resultado da taxa de compressão para diferentes configurações de capacidade de medições.	20
Tabela 3 – Resultado da taxa de compressão para diferentes configurações de limiar de erro.	20
Tabela 4 – Resultado da taxa de compressão para diferentes configurações de média móvel.	21
Tabela 5 – Comparação entre os microcontroladores	22
Tabela 6 – Uso dos recursos computacionais na execução do mecanismo proposto.	23
Tabela 7 – Impacto financeiro provocado pela diferença entre valor real coletado pelo SM e o valor calculado pelo modelo funcional para o ano de 2016.	24
Tabela 8 – Aplicação do mecanismo de compressão adaptativo em um cenário com DR.	25

Lista de abreviaturas e siglas

AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
EMC	<i>Energy Management Controller</i>
EPC	<i>Electrical Power Company</i>
EPS	<i>Electrical Power System</i>
EQM	Erro Quadrático Médio
HEMS	<i>Home Energy Management System</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SG	<i>Smart Grid</i>
SM	<i>Smart Meter</i>
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Definição do problema	2
1.2	Visão Geral da Proposta	3
1.3	Objetivos	3
1.4	Justificativa	4
1.5	Contribuições	5
1.6	Estrutura do Trabalho	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Compressão sem perda	8
2.2	Compressão com perda	9
3	MECANISMO ADAPTATIVO PROPOSTO	11
3.1	Funcionamento do Mecanismo	14
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	17
4.1	Taxa de compressão	18
4.2	Custo computacional	21
4.3	Impacto Financeiro	23
4.4	Integração do mecanismo adaptativo ao cenário de DSM	24
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	27
	REFERÊNCIAS	29

1 Introdução

Estima-se que o consumo global de energia elétrica aumentará em mais de um terço até 2035 (ALONSO-ROSA et al., 2018), sendo que nos últimos anos, o crescimento populacional mundial têm contribuído para o aumento da complexidade enfrentada pelos Sistemas Elétricos de Potência (EPSs, *Electrical Power System*) (VERAS et al., 2018a; MCNEIL; KARALI; LETSCHERT, 2019), os quais precisam garantir o fornecimento de energia elétrica para os consumidores, no instante em que desejarem e com qualidade adequada. O EPS é constituído por um conjunto de instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A geração é responsável por extrair energia elétrica de fontes energéticas, sejam elas renováveis ou não (ex. queda d'água, sol, vento, petróleo, urânio, etc.). A energia gerada é então conduzida por longas distâncias pelo sistema de transmissão até chegar aos centros consumidores. Durante este processo a condução ocorre sob condição de alta tensão, devido a existência de perdas por aquecimento, redução no custo de condutores, dentre outros fatores que dificultam seu transporte. Na distribuição, a energia elétrica de alta tensão é tratada em subestações de modo que possa ser direcionada para os consumidores finais.

Nesse contexto, as Redes Elétricas Inteligentes (SGs, *Smart Grids*) surgiram como uma nova arquitetura para os EPSs, onde aliada a novas Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), objetivam atender a demanda de energia elétrica requerida assegurando qualidade, confiabilidade e disponibilidade (GANDOMAN et al., 2018). Nessa arquitetura, a comunicação bidirecional existente entre a Companhia de Energia Elétrica (EPC, *Electrical Power Company*) e os consumidores desempenha um papel fundamental, pois proporciona maior interação entre eles. Uma das principais contribuições da SG é a presença de sensores espalhados por todo o sistema de distribuição, permitindo que a EPC esteja sempre informada sobre o funcionamento de toda a infraestrutura, podendo detectar possíveis irregularidades e falhas que possam existir, praticamente em tempo real (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019; SANCHEZ-HIDALGO; CANO, 2018). Além disso, os dados coletados auxiliam na aplicação de novas estratégias para redução de custos e uso mais eficiente dos recursos disponibilizados pela EPS (KAPPAGANTU; DANIEL, 2018; KABALCI, 2016b).

Para que a EPC possa monitorar, quase que em tempo real, os recursos utilizados no fornecimento de energia elétrica, é necessário uma infraestrutura de comunicação bastante robusta e bem planejada (FAHEEM et al., 2018). Pensando nisso, a Infraestrutura de Medição Avançada (AMI, *Advanced Metering Infrastructure*) reúne TICs com o objetivo de intermediar a comunicação entre os consumidores e demais recursos da rede com a EPC (MOHASSEL et al., 2014; BALAKRISHNA et al., 2014). As TICs são amplamente

utilizadas em aplicações de cidades inteligentes (BARRERO et al., 2012), internet das coisas (IoT, *Internet of Things*) (MARTÍN; DÍAZ; RUBIO, 2017; SALMAN et al., 2018) e demais áreas que vêm sendo automatizadas por essas tecnologias (LARIOS et al., 2013). No contexto das SGs, a aplicação das TICs costuma ser dividida em dois ambientes que possuem necessidades diferentes: o ambiente residencial e o ambiente externo (EMMANUEL; RAYUDU, 2016).

No ambiente residencial, tecnologias de baixa capacidade de comunicação são utilizadas, pois além da necessidade de conectar diferentes aparelhos próximos entre si, existe a necessidade de conexão com a internet. Para isso, as principais tecnologias utilizadas são baseadas no padrão IEEE 802.11 (WiFi) (TONYALI et al., 2018) ou IEEE 802.15.4 (ZigBee) (MIGUEL et al., 2017). Uma aplicação dessas tecnologias é a utilização dentro de uma residência para conectar sensores e eletrodomésticos ao medidor inteligente e ao gerenciador residencial (LEE; YANG, 2017). Entretanto, em um ambiente externo, onde há a necessidade de conectar dispositivos mais afastados, são utilizadas tecnologias com maior capacidade de alcance, bem como maior capacidade de lidar com grande fluxo de dados. As tecnologias utilizadas para longas distâncias podem ser com fio (ex. Ethernet, fibra ótica, ou *Power Line Communication*) (SEIJO et al., 2016) ou sem fio como a tecnologia WiMAX (AALAMIFAR et al., 2017; ISLAM et al., 2014; DARYAPURKAR; KARANDIKAR, 2017), NB-IoT (MIRAZ et al., 2018), LoRaWAN ou SigFox (OLIVEIRA et al., 2019; AERNOUTS et al., 2018), 5G (ZHANG et al., 2018), GPRS entre outras apresentadas em (FADLULLAH et al., 2011; ANDREADOU; GUARDIOLA; FULLI, 2016). Todas essas tecnologias podem ser integradas a tecnologias de roteamento que são utilizadas para melhor gerenciar o fluxo dos dados (RAMÍREZ; CÉSPEDES, 2015; AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019).

1.1 Definição do problema

Em (TONG; KANG; XIA, 2016) os autores relatam que os 230 milhões de medidores inteligentes (SM, *smart meter*) instalados em uma SG na China geram aproximadamente 29 TB de dados anualmente, sendo que esses dados referem-se apenas ao consumo de energia. Por esses e outros motivos cresce cada vez mais a aplicação de ferramentas para trabalhar com grande volume de dados, bem como aplicações de internet das coisas (IoT) que contribuem de modo a aumentar disponibilidade no fornecimento de energia elétrica, bem como o uso eficiente dos equipamentos e recursos energéticos (TU et al., 2017; KIM et al., 2015; COLLIER, 2017). A presença massiva de dispositivos, coletando e transmitindo dados a todo momento, faz surgir a preocupação com o volume de dados trafegados pelo sistema de comunicação. Grandes volumes de dados podem sobrecarregar a infraestrutura de comunicação acarretando em aumento da latência na transmissão dos pacotes de dados, bem como a possibilidade de perda de pacotes. Dessa forma, trabalhos têm sido

propostos com o objetivo de reduzir a quantidade excessiva desses dados que são gerados constantemente, de modo a evitar a sobrecarga da infraestrutura de comunicação (WEN et al., 2018; TONG; KANG; XIA, 2016).

1.2 Visão Geral da Proposta

Este trabalho propõe a implementação de um mecanismo adaptativo para compressão de dados em um SM, com o objetivo de reduzir o volume de dados enviados, de modo a garantir o recebimento de tais informações pela EPC. Tal mecanismo fornece um modelo funcional que representa o perfil de consumo de determinado consumidor em um determinado horizonte de tempo. Adicionalmente é importante enfatizar que em um cenário de gerenciamento pelo lado da demanda o processamento é feito pelo lado do consumidor, por exemplo no SM. Dessa forma, com o objetivo de contribuir na redução de custo na implementação de programas de gerenciamento pelo lado da demanda, faz-se necessária a implementação de mecanismos que possam ser embarcados em hardware de baixo custo.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor um mecanismo adaptativo para compressão de dados, baseado em ajuste de curvas que possa representar um conjunto de medições de consumo de energia elétrica por meio de um modelo funcional. Tal mecanismo possui como objetivo reduzir o fluxo de dados trafegados pela AMI garantindo o recebimento das informações pela EPC em tempo hábil.

Para que esse objetivo principal seja alcançado, são apontados os seguintes objetivos específicos:

- Definir os tipos de funções a serem utilizadas de modo que elas forneçam ao mecanismo diferentes comportamentos para representar o perfil de consumo de maneira mais adequada;
- Definir os parâmetros passíveis de ajuste que permite selecionar um determinado tipo de função de acordo com o comportamento de consumo apresentado nas medições coletadas pelos SMs;
- Analisar os parâmetros passíveis de ajuste do mecanismo para obter a configuração que apresenta maior nível de compressão dos dados;
- Verificar o impacto financeiro provocado pela imprecisão apresentada ao recuperar as medições, uma vez que estas são utilizadas para fins de tarifação, por exemplo;

- Implementar o mecanismo em um hardware de baixo poder computacional para validar sua implementação, analisando o tempo de execução, quantidade de memória e CPU utilizada;
- Verificar a viabilidade da aplicação do mecanismo de compressão de dados aliado a outros programas presentes no cenário de gerenciamento pelo lado da demanda (DSM, *Demand Side Management*);
- Aplicar um filtro de pré-processamento para suavizar a possível presença de dados discrepantes que possam prejudicar o desempenho do mecanismo de compressão.

1.4 Justificativa

Sistemas de monitoramento implantados de forma a gerenciar o comportamento da SG analisam os dados que passam pela infraestrutura de comunicação com o intuito de detectar falhas, distúrbios de qualidade de energia elétrica (FLINN; DUGAN, 1992), dados de consumo, etc. (DAKI et al., 2017). Tais sistemas, além de estarem bem sincronizados, precisam garantir a segurança dos dados trafegados contra ataques cibernéticos (WANG; LU, 2013). Diversos dispositivos são utilizados para sensorar toda a SG constantemente, dentre os diversos dispositivos existentes, destacam-se os SMs (VELOSO et al., 2018; AVANCINI et al., 2019), que são dispositivos responsáveis por inferir o consumo de energia de determinado consumidor, esteja ele em uma instalação residencial, industrial ou comercial. Além disso, os SMs podem possuir outras funcionalidades, como detectar e classificar distúrbios de qualidade de energia (BORGES et al., 2016), inferir consumo de água, gás, temperatura, etc (NI et al., 2018; KABALCI, 2016b).

Os dados gerados a partir do monitoramento dos SMs são enviados para a EPC por meio da AMI numa frequência de tempo que varia de 5 a 60 minutos (WEN et al., 2018; LAURINEC; LUCKÁ, 2017; ALAHAKOON; YU, 2016), entretanto a frequência de envio é um parâmetro que depende de como os projetistas configuram a SG. Para trabalhos que realizam o monitoramento de carga (WANG et al., 2018; BAETS et al., 2019), por exemplo, existe a necessidade de um monitoramento quase que em tempo real, o que aumenta consideravelmente a quantidade de dados gerados pelos SMs, bem como a quantidade de dados que apresentam ruídos (RAZAVI et al., 2019; LIU et al., 2018; AL-WAKEEL; WU; JENKINS, 2016).

Além de permitir um melhor gerenciamento dos recursos existentes, toda a estrutura implementada nas SGs, bem como os dados coletados, viabilizam a criação de novas formas de gerenciar o uso da energia elétrica, garantindo o equilíbrio entre o fornecimento e o seu consumo (AMAN; SIMMHAN; PRASANNA, 2013). O gerenciamento pode ser feito tanto pelo lado do fornecimento, quanto pelo lado da demanda (MACEDO et al., 2015) sendo que, a existencia da comunicação bidirecional entre a concessionária e os

consumidores e a presença de objetos conectados à internet (PATTAR et al., 2018) estão direcionando os esforços para o aprimoramento do DSM. O DSM oferece um conjunto de ações que auxiliam o consumidor a planejar e monitorar seu consumo de energia elétrica durante horários de pico (KHAN et al., 2016). A aplicação de tais ações varia da sugestão de troca dos equipamentos por outros mais eficientes, até a aplicação de programas de resposta a demanda que sugerem mudanças no perfil de consumo dos consumidores em troca de incentivos financeiros, com o intuito de aumentar a disponibilidade e a eficiência no fornecimento de energia elétrica (AHMAD et al., 2018; HEMMATI; SABOORI, 2017; VERAS et al., 2018b).

1.5 Contribuições

As principais contribuições relacionadas a abordagem proposta neste trabalho podem ser enumeradas como:

1. O desenvolvimento de um mecanismo adaptativo para compressão de dados aplicado em SMS;
2. O cálculo de um modelo funcional que permite representar o perfil de consumo em um determinado horizonte de tempo;
3. Redução do fluxo de dados que são transmitidos pela AMI evitando problemas relacionados à comunicação, tais como: perda de conexão, aumento da latência na transmissão de pacotes, dentre outros.
4. A construção de um cenário prático que analisa o impacto provocado pela implementação do mecanismo em um cenário próximo da realidade;
5. A incorporação de uma solução para suavização de dados discrepantes, o quais podem comprometer a definição do perfil de consumo e consequentemente o valor da tarifa cobrada ao consumidor;
6. Análise de viabilidade do mecanismo de compressão de dados no contexto de DSM.

1.6 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica deste trabalho, contextualizando os principais trabalhos que embasaram a criação do mecanismo adaptativo de compressão proposto.

No Capítulo 3 o mecanismo adaptativo de compressão de dados é apresentado, descrevendo seu funcionamento. No Capítulo 4 os experimentos realizados para validação

do mecanismo são apresentados, bem como os resultados obtidos e as discussões geradas a partir dos resultados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões bem como as possibilidades de trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Por muito tempo os medidores eletromecânicos têm sido utilizados para registrar o consumo acumulado de energia elétrica, sendo que, periodicamente existe a necessidade da leitura dos valores registrados para fins de tarifação. Essa tarefa árdua é realizada por leituristas que se deslocam até os medidores para registrar o consumo e tarifar o consumidor.

Com o intuito de desenvolver um dispositivo com mais funcionalidades e com mais tecnologia embarcada, surgiram os medidores inteligentes. Esses dispositivos são responsáveis por não apenas monitorar mas também armazenar parte do histórico de consumo, além de transmitir essas informações para uma central, comumente associada à concessionária de energia. Tal dispositivo está associado a cada consumidor e possui em sua implementação sensores que coletam informações, principalmente relacionadas a energia elétrica, como por exemplo tensão, ângulo de fase e frequência (KABALCI, 2016a). Além disso, em alguns casos, os medidores inteligentes são capazes também de monitorar outras variáveis, como o consumo de água, gás e/ou calor (NI et al., 2018).

Os medidores são de fundamental importância para a implementação da rede elétrica inteligente, pois monitoram os consumidores de perto, realizando leituras e disponibilizando-as para o consumidor. Para cada consumidor existe um medidor inteligente associado, que coleta informações e viabiliza a análise de fatores que influenciam a energia elétrica. Dentre os fatores passíveis de análise pelos medidores inteligentes, destacam-se: monitorar a qualidade da energia (DUGAN et al., 2012), adquirir conhecimento dos hábitos dos consumidores (PAWAR et al., 2017) e conscientizar os consumidores para um consumo mais eficiente.

Para que a concessionária tenha capacidade de monitorar toda a rede elétrica é necessário um sistema de comunicação bastante robusto e bem planejado. Pensando nisso a infraestrutura de monitoramento avançada foi desenvolvida e reúne tecnologias de comunicação, monitoramento e segurança com o objetivo de intermediar a comunicação entre os consumidores e demais recursos da rede com a concessionária (MOHASSEL et al., 2014; BALAKRISHNA et al., 2014). Muitas das tecnologias utilizadas nas SGs são amplamente aplicadas na área de redes de sensores sem fio (WSN, *Wireless sensor Network*) e isso deve-se ao fato de ambas as áreas possuírem similaridades entre si (ARAÚJO et al., 2014; LIU, 2012; SUN; WANG, 2014). Dessa forma, tal semelhança motivou a busca por trabalhos relacionados, tanto na área de SGs, como também em WSNs, de tal forma que pudessem nortear o desenvolvimento do mecanismo adaptativo proposto neste trabalho.

Nas WSNs os nós sensores são dispositivos responsáveis por monitorar determinado

ambiente e possuem recursos energéticos e computacionais bastante limitados. Tais dispositivos, coletam e enviam as medições inferidas constantemente para um concentrador, denominado *sink node*, que armazena e processa as informações coletadas. As tecnologias de comunicação utilizadas pelos nós sensores para transmitir e receber dados são um dos principais fatores para a redução da sua vida útil, pois consomem bastante energia. Dessa forma, esforços para reduzir o volume de dados objetivam, dentre outros aspectos, o prolongamento do tempo de vida da rede para aumentar sua disponibilidade (UTHAYAKUMAR; VENGATTARAMAN; DHAVACHELVAN, 2019; WU; TAN; XIONG, 2016).

Nas SGs os diversos SMs espalhados por todo o sistema de distribuição fornecem um grande volume de dados que são trafegados pelo sistema de comunicação para a EPC. Apesar de não possuírem limitações em relação à energia consumida por tais dispositivos, a infraestrutura de comunicação muitas vezes opera sobrecarregada, pois além dos SMs, diversos outros dispositivos utilizam tal estrutura.

Diversas técnicas encontradas na literatura objetivam comprimir grandes quantidades de dados para minimizar os custos associados à infraestrutura de comunicação e ao armazenamento de dados (WEN et al., 2018; UTHAYAKUMAR; VENGATTARAMAN; DHAVACHELVAN, 2018; PARMAR; JINWALA, 2016). As técnicas de compressão existentes podem ser classificadas em técnicas que não apresentam perda de informação recuperada (*lossless*) ou que apresentam certo nível de imprecisão (*lossy*).

2.1 Compressão sem perda

Técnicas de redução que não apresentam nenhum nível de imprecisão nas informações recuperadas são ideais, porém demandam alto custo computacional, inviabilizando sua aplicação em determinados contextos. Em Ringwelski et al. (2012) os autores realizaram um estudo a respeito de quatro técnicas de compressão de dados sem perda (*Adaptive Trimmed Huffman* (ATH), *Adaptive Markov Chain Huffman Coding* (AMCH), *Lempel Ziv Markov Chain Algorithm* (LZMA), *Lempel Ziv-Markov Chain-Huffman* (LZMH)). Tais algoritmos são variações/combinções de duas principais técnicas, Huffman (1952) e Welch e Welch (1984). As métricas utilizadas para avaliar o desempenho foram a quantidade de memória utilizada, a taxa de compressão e o tempo de processamento. Após análises, os autores concluíram que o algoritmo mais apropriado para aplicar em SMs seria o LZMH pois sua execução demanda um tempo razoável e apresenta uma compressão entre 75% e 90%. Além disso os autores concluíram que para uma abordagem onde o tempo de execução seja crucial o ATH apresentou ser a técnica mais apropriada, apesar de sua compressão ter alcançado valores entre 40% e 60% nos resultados obtidos.

2.2 Compressão com perda

Nas WSNs uma forma de reduzir a quantidade de dados é agrupar os dados dos dispositivos que estão próximos fisicamente, devido a correlação espacial existente entre eles (AFSAR; TAYARANI-N, 2014; WANG et al., 2016; LEMOS et al., 2018). Outra forma de prolongar o tempo de vida da rede é desligar certos recursos quando eles não estão sendo utilizados (INDHUMATHI et al., 2014). No entanto no contexto de SG o agrupamento de diferentes SMs não aparenta ser uma solução interessante, pois não necessariamente os SMs mais próximos fisicamente apresentam medições de consumo similares.

Além da correlação espacial existente devido à proximidade física entre os nós sensores, a correlação temporal pode ser utilizada como motivação para agrupar não mais os dispositivos, mas sim os dados coletados. Em Capo-Chichi et al. (2009) os autores propuseram o K-RLE, que é uma técnica de compressão de dados onde os dados coletados sequencialmente são agrupados caso a diferença entre eles seja menor ou igual a um limiar satisfatório, definido previamente. Em simulações os autores conseguiram reduzir a quantidade de dados que deveriam ser enviados em 56%. No entanto, a escolha do K deve ser feita por um especialista que deve preestabelecer o limite de erro aceitável, pois a informação recuperada não é igual à original inferida. Além disso a compressão é realizada apenas para medições coletadas sequencialmente e a presença de dados discrepantes podem interferir no processo.

Em Carvalho et al. (2011b), Carvalho et al. (2011a) os autores propuseram uma abordagem utilizando regressão linear múltipla onde os dados coletados são representados por uma ou mais retas de acordo com os valores de coeficiente de Pearson e coeficiente de correlação. Em ambos os trabalhos ao invés de enviar os dados brutos, são enviados apenas os coeficientes da reta. Tal abordagem apesar de reduzir a quantidade de dados, bem como o custo associado ao armazenamento não permite recuperar os dados originalmente utilizados para calcular os coeficientes. Outros trabalhos apresentaram propostas baseada em regressão linear e não linear (CLEMENTS; MCCULLOCH; NIXON, 2015; EICHINGER et al., 2015) porém não apresentaram uma abordagem onde outros tipos de funções pudessem ser analisados de acordo com o comportamento dos dados.

Apesar da existência de perda de informação as técnicas de compressão buscam reter a parte mais valiosa da informação, para que mesmo imprecisa ainda seja aceitável. Dessa forma, o presente trabalho apresenta um mecanismo adaptativo de compressão de dados, que de forma automática seleciona o modelo funcional mais adequado, dentre as opções, com o objetivo de representar um conjunto de medições referentes ao consumo de energia elétrica. Tal mecanismo apresenta imprecisão nos valores recuperados pelo modelo, no entanto o nível de imprecisão é controlado por um limiar de erro aceitável previamente estabelecido.

3 Mecanismo Adaptativo Proposto

Com o objetivo de reduzir o volume de dados trafegados pela AMI nas SGs, o presente trabalho apresenta um mecanismo de compressão de dados baseado em ajuste de curva. Ao reduzir o volume de dados enviados por SMs reduz-se os custos associados à transmissão de dados, favorecendo o bom funcionamento da infraestrutura de comunicação. Além disso, diminui a possibilidade de sobrecarregamento da infraestrutura, uma vez que isso pode trazer problemas, como aumento da latência na troca de mensagens, perda de pacotes, dentre outros. O mecanismo adaptativo proposto neste trabalho utiliza ajuste de curvas para encontrar um modelo funcional, dentre um conjunto de opções, que melhor representa determinado conjunto de medições de consumo de energia elétrica, sendo que esta escolha deve ser de forma automática durante a execução do mecanismo. Dessa forma, ao invés de enviar pacotes de dados contendo o valor do consumo, o SM envia apenas um pacote contendo coeficientes de uma função que representa o conjunto de medições.

A Figura 1.a ilustra o princípio básico do funcionamento do mecanismo de compressão de dados, onde duas funções lineares representam o perfil de consumo apresentado pelas 20 medições coletadas por um SM. A linha azul representa o perfil de consumo real e as linhas vermelhas representam os ajustes lineares realizados. Nesse caso, ao invés do SM enviar para a EPC os 20 pacotes de dados contendo os valores do quilowatt-hora (kWh) consumido, será necessário enviar dois pacotes, onde cada pacote contém apenas dois coeficientes relativos às funções lineares calculadas. Por meio dos coeficientes a EPC poderá recuperar os valores de kWh consumidos por determinado consumidor.

No entanto, percebe-se que para o perfil ilustrado no gráfico as funções lineares não apresentam uma boa representação, pois os valores recuperados por ambas diferem bastante dos originais. Por isso, outros tipos de funções, pouco exploradas em outros trabalhos, foram consideradas no desenvolvimento deste mecanismo. Na Figura 1.b os ajustes realizados para dois polinômios de grau 3 representam de forma mais apropriada o comportamento de consumo apresentado. Dessa forma, os valores recuperados pela EPC por meio dos coeficientes calculados serão mais próximos dos valores reais coletados pelo SM.

Para uma representação fiel aos dados originais, uma opção seria a aplicação de interpolação para encontrar uma função polinomial que fosse possível recuperar os valores exatos, sem qualquer diferença dos valores originais. No entanto, aplicar interpolação para o conjunto de 20 amostras apresentadas na Figura 1 resultaria em 21 coeficientes que deveriam ser enviados para a EPC. Tal abordagem não é vantajosa pois mais informações seriam enviadas.

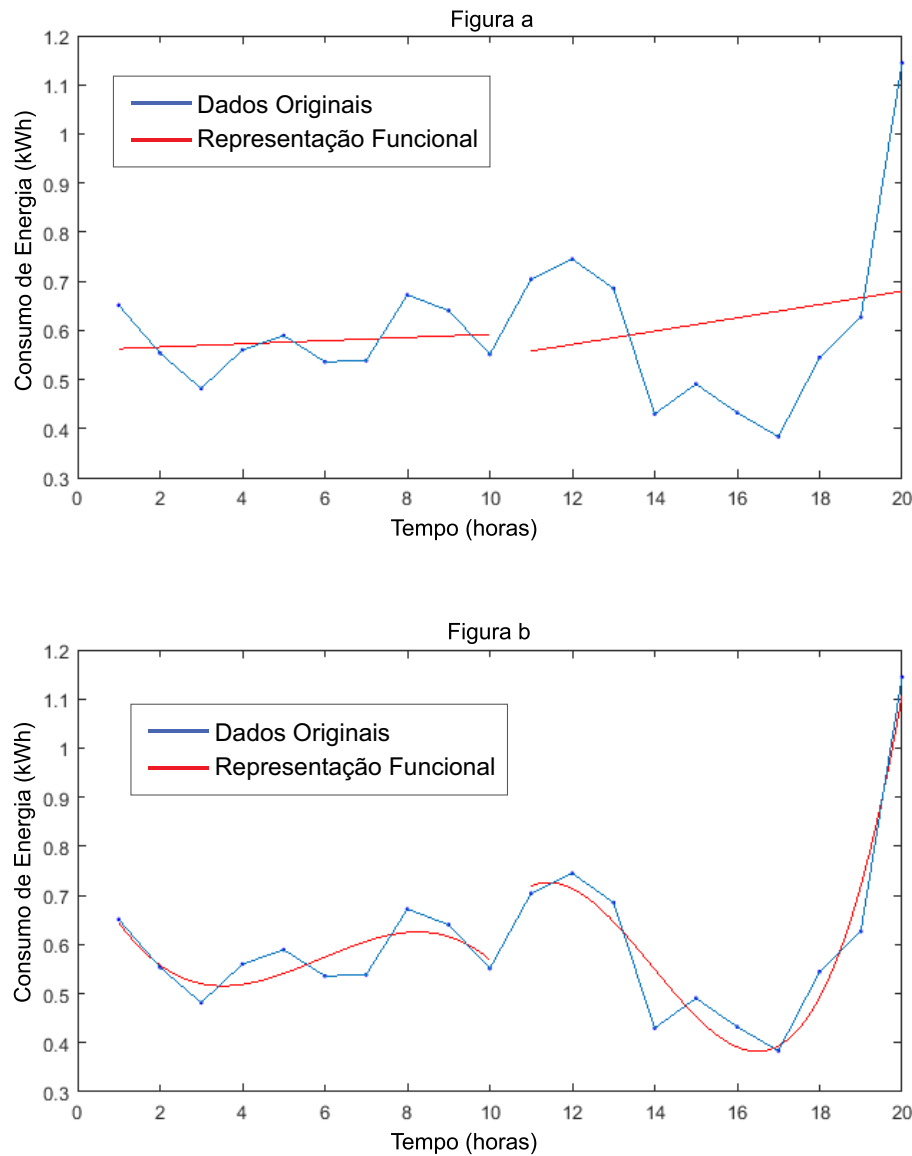


Figura 1 – Comparação entre ajuste linear e polinomial de grau 3.

Apesar de uma função polinomial melhor representar a não linearidade apresentada em um perfil de consumo, nem sempre esse tipo de função apresentará um melhor resultado, pois o perfil varia ao longo do dia e depende do consumidor. Dessa forma, o mecanismo proposto apresenta uma abordagem adaptativa onde um determinado tipo de função é escolhido de forma automática, de acordo com comportamento apresentado pelo consumidor.

Para que o mecanismo possua uma variedade de funções, de comportamentos diferentes, foram utilizados os seguintes tipos de funções: linear, polinomial de grau 2, polinomial de grau 3 e exponencial. Os coeficientes das funções utilizadas são calculados por meio da Equação 3.1 que representa um sistema linear onde sua resolução apresenta o vetor de coeficientes (Equação 3.3). Cada tipo de função possui uma quantidade q de coeficientes, sendo esse parâmetro ajustado durante o cálculo. Os valores de x e y utilizados

nas Equações 3.2 e 3.4 representam o identificador de cada medição coletada pelo SM e o valor do kWh coletado, respectivamente.

$$X.B = T \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \dots & \sum x^q \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \dots & \sum x^{q+1} \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \dots & \sum x^{q+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x^q & \sum x^{q+1} & \sum x^{q+2} & \dots & \sum x^{2q} \end{bmatrix} = X \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix} = B \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2y \\ \vdots \\ \sum x^qy \end{bmatrix} = T \quad (3.4)$$

Ao receber os coeficientes da função, a concessionária poderá remontar a função e atribuir valores para a variável independente, para então recuperar o valor do kWh coletado pelo SM. Os valores encontrados permitem à concessionária tarifar o consumidor, ou até mesmo ajustar o custo associado ao uso da energia elétrica, em um cenário onde a precificação varia no decorrer do tempo.

Para quantificar a qualidade do ajuste realizado, a fim de comparar os diferentes tipos de funções é utilizado o cálculo do erro quadrático médio (eqm) que mensura a diferença existente entre o valor real coletado pelo SM e o valor recuperado pelo modelo funcional calculado. O cálculo do eqm é apresentado na Equação 3.5 onde y^{est} representa o valor estimado pela função, y^{real} o valor real coletado pelo SM e n a quantidade de medições presentes no conjunto de dados utilizados para calcular o modelo.

$$eqm = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_i^{real})^2}{n} \quad (3.5)$$

3.1 Funcionamento do Mecanismo

A Figura 2 ilustra o funcionamento do mecanismo adaptativo de compressão de dados proposto neste trabalho. Inicialmente no passo 1 o SM coleta a medição e adiciona em uma estrutura de *buffer* em memória, no entanto, para que o ajuste possa ser realizado, são necessárias no mínimo duas medições, sendo assim mais uma medição deve ser adicionada no *buffer* (passo 2). Em seguida com as medições existentes, os coeficientes dos diferentes tipos de funções são calculados, bem como seus respectivos valores de erro quadrático médio (passo 3). Para evitar que os modelos calculados não estejam muito diferentes do comportamento dos dados originais, um limiar de erro é preestabelecido determinando assim, o limite máximo de medições que um modelo funcional poderá representar. Caso alguma das funções possua um *eqm* menor que o limiar significa que o erro existente é considerado aceitável, sendo assim o SM deve prosseguir adicionando mais uma medição ao *buffer* repetindo o processo no passo 3.

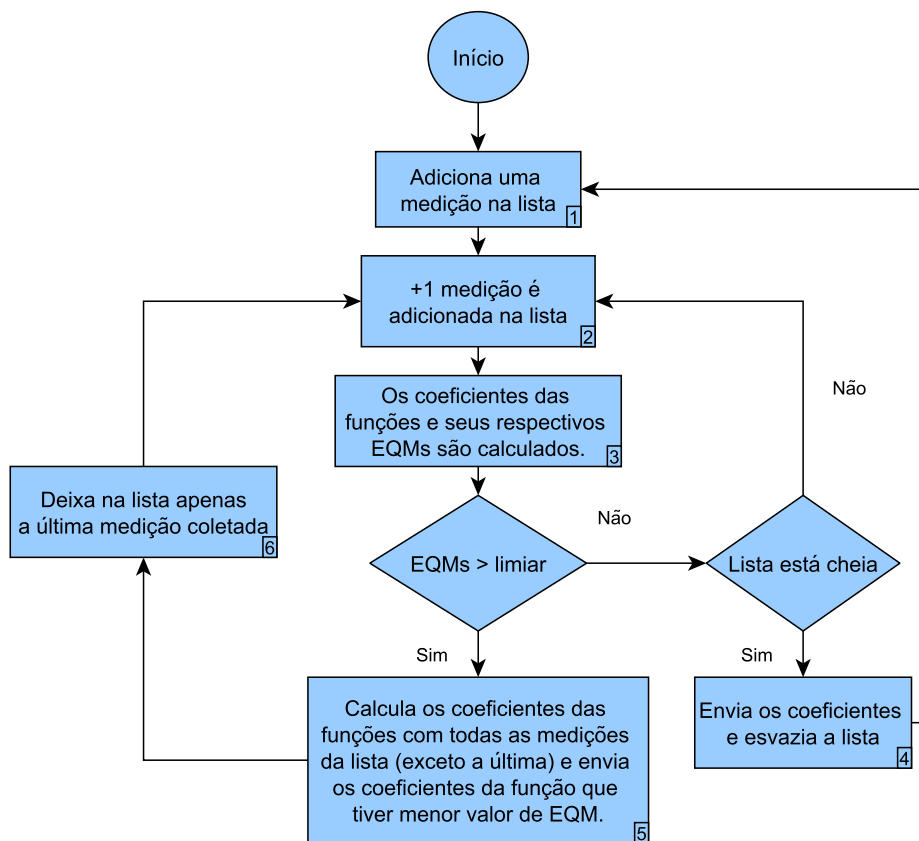


Figura 2 – Funcionamento do mecanismo adaptativo de compressão de dados.

Quando o *eqm* é menor que o limiar mas o *buffer* já está cheio isso significa que a concessionária está no limite máximo de tempo de espera, sendo necessário enviar as informações de consumo (passo 4). Dessa forma, o SM transmite para a concessionária os coeficientes da função que apresenta o menor *eqm* e então esvazia o *buffer*, retornando ao passo 1. Caso nenhum *eqm* seja menor ou igual ao limiar significa que ao adicionar uma nova

medição o ajuste que estava satisfatório não está mais, portanto devem ser transmitidos os coeficientes das medições existentes no *buffer* com exceção a última adicionada (passo 5). Feito isso, restará no *buffer* apenas o elemento desconsiderado (passo 6) e o fluxo retornará para o passo 2.

O mecanismo proposto apresenta a vantagem de selecionar de forma automática um tipo de função que melhor representa determinado conjunto de medições. Para alcançar bons resultados é necessário configurar dois parâmetros passíveis de ajuste: o limiar de erro e a capacidade do *buffer*. O limiar de erro diz respeito ao nível de imprecisão nos valores recuperados pelos coeficientes e a capacidade de *buffer* representa a quantidade de medições que são representadas por um modelo, bem como representa o tempo de espera gasto pela concessionária para receber novas informações. Além disso, outro ponto a ser destacado refere-se a presença de valores discrepantes que podem afetar o desempenho do mecanismo durante o processo de ajuste, interrompendo a inserção de outras medições sem que o *buffer* esteja cheio. Dessa forma, nos experimentos realizados uma etapa de pré-processamento foi adicionada para suavizar a possível presença de outliers que pudessem prejudicar o desempenho do mecanismo.

4 Experimentos e Resultados

Para avaliar o desempenho do mecanismo proposto foram simulados diversos cenários de experimentação em que os parâmetros passíveis de ajuste (limiar de erro e capacidade de buffer) foram analisados. Para cada cenário o mecanismo foi submetido a diferentes perfis de consumo, pois o desempenho do mecanismo depende do comportamento de consumo. Todas as medições utilizadas nas simulações foram extraídas da ferramenta *Load Profile Generation* (LPG) (PFLUGRADT, 2016) e representam um monitoramento de consumo minuto a minuto durante o ano de 2016. A escolha do ano deve-se ao fato de que tais medições foram utilizadas em Veras et al. (2018b), sendo este trabalho considerado na análise de viabilidade de integração no cenário de DSM. Por ser um país de dimensões continentais e regiões com temperaturas médias variadas (Figura 4) adotou-se para fins de experimentação três cidades brasileiras (Curitiba, São Paulo e Teresina). Por meio do LPG foram extraídos cinco diferentes perfis de consumo para cada uma das cidades (Tabela 1), onde o gráfico da Figura 3 ilustra os diferentes comportamentos dos perfis.

Tabela 1 – Descrição dos diferentes perfis de consumidores

Perfil	Descrição
1	Adulto solteiro
2	Casal sem filhos
3	Casal com 03 filhos
4	Mãe com 02 filhos
5	Casal com 02 filhos

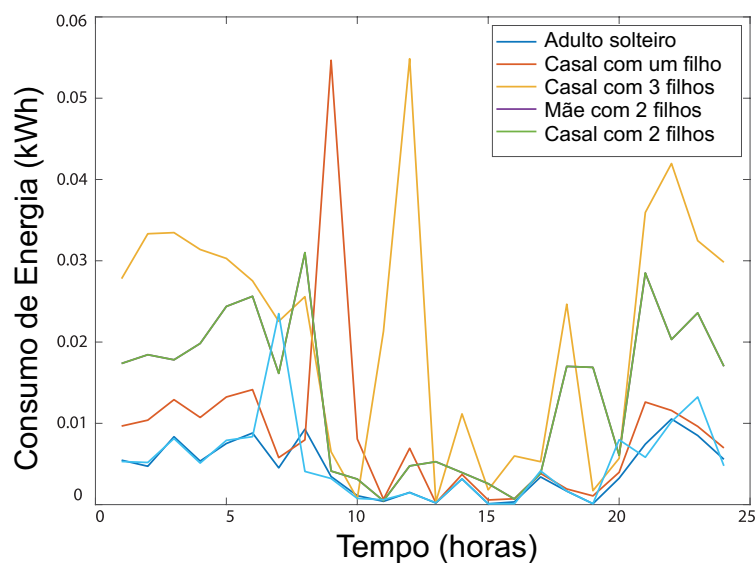


Figura 3 – Diferentes perfis de consumo.

As cidades escolhidas possuem temperaturas médias diferentes, o que influencia no consumo da energia elétrica e também no desempenho do mecanismo, uma vez que utiliza uma representação funcional para representar o comportamento de consumo.

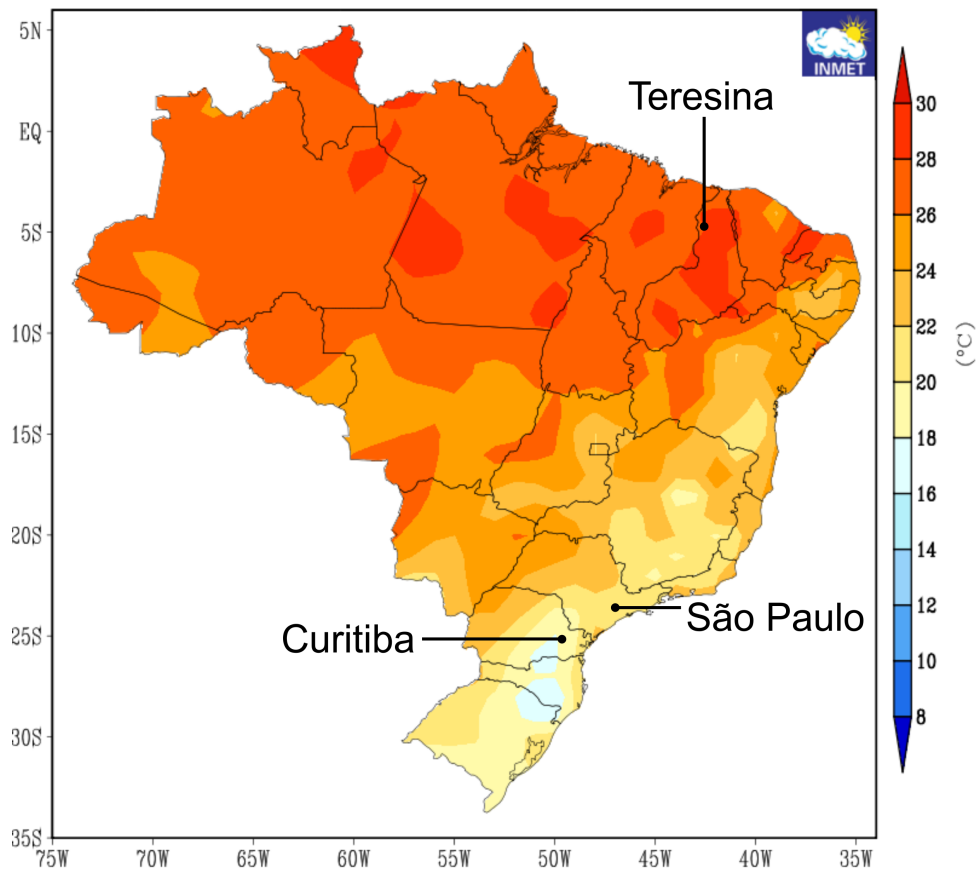


Figura 4 – Temperatura média observada no Brasil (INMET, 2018)

Para analisar o desempenho do mecanismo adaptativo de compressão de dados proposto, quatro diferentes cenários foram estudados: a) taxa de compressão de dados para diferentes configurações de limiar de erro e capacidade de *buffer*, b) custo computacional associado à execução do mecanismo em um hardware de baixa capacidade, c) impacto financeiro provocado pela imprecisão existente nos dados recuperados e d) a possibilidade de aplicar do mecanismo integrado a outros programas apresentados no cenário de DSM.

4.1 Taxa de compressão

A taxa de compressão quantifica o nível de compressão encontrado pelo mecanismo, cujo valor é calculado ao dividir a quantidade de dados após a compressão pela quantidade de dados originais (Equação 4.1). Para que haja a compressão o valor obtido por essa

métrica deve estar entre 0 e 1, pois valores acima de 1 representam a expansão de dados.

$$\text{Taxa de compressão} = \frac{\text{tamanho dos dados comprimidos}}{\text{tamanho dos dados originais}} \quad (4.1)$$

Nos experimentos foram simulados 300 diferentes cenários (3 cidades X 5 perfis X 4 diferentes capacidades de buffer X 5 diferentes limiares de erro) onde ao analisar a taxa de compressão de dados proporcionada pelo mecanismo, os resultados obtidos variam de acordo com a configuração selecionada. Os valores encontrados são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

A quantidade de medições que são representadas por um modelo funcional não depende apenas do valor do erro, pois quanto mais medições forem adicionadas ao buffer, mais tempo a concessionária fica a espera de novas informações. Supondo uma capacidade de no máximo 20 medições e levando em consideração que as medições são coletadas a cada 15 minutos tem-se que a concessionária pode passar até 5 horas para receber as informações coletadas pelo SM. Dessa forma, um limite máximo de medições deve ser estipulado e esse parâmetro é avaliado nas simulações com diferentes valores. A Tabela 2 apresenta os resultados sob o ponto de vista das quatro diferentes configurações de tamanho de buffer.

A partir dos resultados percebe-se que independentemente do tipo de perfil do consumidor, bem como da cidade onde ele se encontra, a medida que a capacidade máxima do buffer aumenta, maior é a compressão obtida pelo mecanismo adaptativo. Em outras palavras, quanto maior a capacidade do buffer, melhor é o desempenho do mecanismo, comprimindo mais dados e reduzindo ainda mais o fluxo de dados trafegados pela infraestrutura de comunicação. No entanto, esse parâmetro possui impacto direto no tempo de espera da concessionária para receber as medições de consumo, sendo assim este parâmetro deve ser estabelecido pela mesma com bastante cuidado.

O limiar de erro é outro parâmetro passível de ajuste que deve ser um valor predeterminado pela concessionária com bastante cuidado pois um valor muito pequeno prejudica a compressão dos dados obtida pelo mecanismo, mas também um valor de limiar grande pode prejudicar financeiramente o consumidor ou a concessionária, devido a elevada imprecisão aceitável no valor do *kWh* recuperado pelo modelo funcional. A Tabela 3 apresenta os resultados para diferentes configurações de limiar de erro, onde o comportamento do mecanismo independe do perfil de consumo, bem como da localização do consumidor.

Para cada cenário simulado também foi analisado o impacto na compressão dos dados ao aplicar um filtro para suavizar a presença de dados discrepantes que possam não só prejudicar o desempenho do mecanismo, mas prejudicar o processo de tarifação ao cobrar do consumidor um valor inconsistente. Por questões de simplicidade foi utilizado o

Tabela 2 – Resultado da taxa de compressão para diferentes configurações de capacidade de medições.

Cidade	Capacidade	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Curitiba	6	0.1667	0.1692	0.1699	0.1688	0.1688
	12	0.0834	0.0870	0.0880	0.0864	0.0864
	18	0.0556	0.0597	0.0609	0.0591	0.0591
	24	0.0417	0.0461	0.0474	0.0454	0.0454
São Paulo	6	0.1667	0.1691	0.1699	0.1687	0.1687
	12	0.0834	0.0869	0.0880	0.0863	0.0863
	18	0.0556	0.0596	0.0609	0.0589	0.0589
	24	0.0417	0.0461	0.0474	0.0452	0.0452
Teresina	6	0.1667	0.1692	0.1697	0.1687	0.1687
	12	0.0834	0.0869	0.0878	0.0863	0.0863
	18	0.0556	0.0596	0.0606	0.0589	0.0589
	24	0.0417	0.0461	0.0471	0.0452	0.0452

Tabela 3 – Resultado da taxa de compressão para diferentes configurações de limiar de erro.

Cidade	Limiar	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Curitiba	10^{-5}	0.0870	0.1044	0.1092	0.1018	0.1018
	10^{-4}	0.0868	0.0876	0.0881	0.0874	0.0874
	10^{-3}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
	10^{-2}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
	10^{-1}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
São Paulo	10^{-5}	0.0870	0.1043	0.1093	0.1013	0.1013
	10^{-4}	0.0868	0.0876	0.0881	0.0873	0.0873
	10^{-3}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
	10^{-2}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
	10^{-1}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
Teresina	10^{-5}	0.0870	0.1042	0.1082	0.1012	0.1012
	10^{-4}	0.0868	0.0876	0.0879	0.0873	0.0873
	10^{-3}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
	10^{-2}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868
	10^{-1}	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868	0.0868

cálculo da média móvel em diferentes configurações: média móvel simples, exponencial, triangular e modificada (MATLAB, 2019b). Todas essas variações são implementadas pela ferramenta MATLAB (MATLAB, 2019a) e foram utilizadas no pré-processamento dos dados.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a aplicação das diferentes configurações de média móvel disponíveis, com o objetivo de analisar o impacto na taxa de compressão. Os resultados obtidos desta análise apresentam uma pequena variação na taxa de compressão que não compromete o desempenho do mecanismo. Mesmo assim, em trabalhos futuros um estudo mais aprofundado deve ser realizado para avaliar o desem-

penho de outras ferramentas que suavizam ou tratam os dados discrepantes que possam influenciar as medições.

Tabela 4 – Resultado da taxa de compressão para diferentes configurações de média móvel.

Média Móvel	Taxa de Compressão
Sem média móvel	0.1466
Simples	0.1612
Exponencial	0.1612
Triangular	0.1612
Modificada	0.1475

Os valores apresentados nas Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos ao submeter o mecanismo adaptativo de compressão de dados a diversos experimentos, para diferentes configurações de limiar de erro e capacidade de buffer. Nos resultados apresentados os valores de taxa de compressão obtidos são similares quando o mecanismo é submetido a mesma configuração, isso deve-se ao fato de que a aplicação do mecanismo apresenta resultados semelhantes independentemente do perfil de consumo. Mais especificamente, alguns resultados obtidos na Tabela 3 são iguais, mesmo sob condições de diferentes limiares de erro, a justificativa para esses valores refere-se à precisão encontrada pelo ajuste ser menor do que o limiar definido. Numa análise mais abrangente pode-se garantir que as melhores taxas de compressão são encontradas ao aplicar um alto valor de limiar de erro e capacidade de buffer. Além disso ao analisar os resultados da Tabela 4 pode-se perceber que a aplicação da média móvel para os cenários experimentados não possui um impacto significativo na taxa de compressão, sendo o resultado obtido um valor satisfatório.

4.2 Custo computacional

Para analisar as questões relacionadas ao custo computacional do mecanismo adaptativo, um experimento foi desenvolvido para extrair informações que validem sua implantação no SM. Para isso, foi realizado um levantamento (apresentado na Tabela 5) dos principais microcontroladores presentes no mercado atual, que são mais utilizados pelo estado da arte para realização de testbeds no cenário de IoT (CHERNYSHEV et al., 2018; GUNDUZ; DAS, 2018; SERRANO et al., 2018).

Entre os principais microcontroladores, estão o Arduino UNO (ARDUINO, 2018) e o DUE. Na família ESPRESSIF (ESPRESSIF, 2018) estão o ESP8266 01, com WiFi e baixo consumo de energia e o ESP32, que é a última versão lançada que possui maior poder de processamento, maior espaço de memória, WiFi, bluetooth 4.0 e mais portas programáveis. Ao comparar as opções elencadas, o ESP32 é a que apresenta um melhor custo benefício, no entanto durante o desenvolvimento do tesbed alguns problemas com

Tabela 5 – Comparação entre os microcontroladores

Placa	Memória <i>Flash</i>	<i>Clock</i>	RAM	Wifi
Arduino UNO	32 KB	16 MHz	2 KB	No
Arduino DUE	512 KB	84 Mhz	96 KB	No
ESP8266 01	512 KB	160 Mhz	64 KB	Yes
ESP32	4MB	240 MHz	520 KB	Yes
Raspberry Pi 3	16 GB	1.4 GHz	1 GB	Yes

sua utilização foram encontrados, devido sua capacidade de memória bastante limitada. Dessa forma, para a simulação de tesbed foi utilizado o Raspberry Pi (Figura 5) para desempenhar o papel do SM, por ser o dispositivo com maiores recursos computacionais, dentre as opções analisadas.



Figura 5 – Raspberry Pi 3

A Figura 6 representa o cenário simulado onde os SMs coletam os dados de consumo e enviam para um concentrador que representa a EPC. Os SMs estão conectados a uma rede de baixo alcance que representa uma determinada área ou região (bairro) de uma cidade. Entre os consumidores e a EPC está o wireless gateway, que representa uma antena que coleta as informações dos SMs e as envia para a EPC; essas tecnologias podem utilizar 5G, NB-IoT, WiMax, GSM entre outras. E por fim, a EPC, que é responsável por administrar toda a infraestrutura utilizada para fornecer energia elétrica aos consumidores.

Neste experimento buscou-se analisar não apenas a execução do mecanismo, mas também a execução do ajuste de curva para os tipos de funções implementadas. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos onde as métricas analisadas foram: o tempo de execução; o uso de memória e cpu do Raspberry Pi.

Do exposto na Tabela 6 pode-se perceber que para tipos de funções que demandam maior quantidade de coeficientes a serem calculados nota-se um aumento do uso dos recursos de memória e cpu. No entanto, mesmo que o SM possua outras funcionalidades que demandem maior esforço dos recursos computacionais existentes, os custos associados à execução do mecanismo não implica na necessidade de adquirir um hardware mais potente.

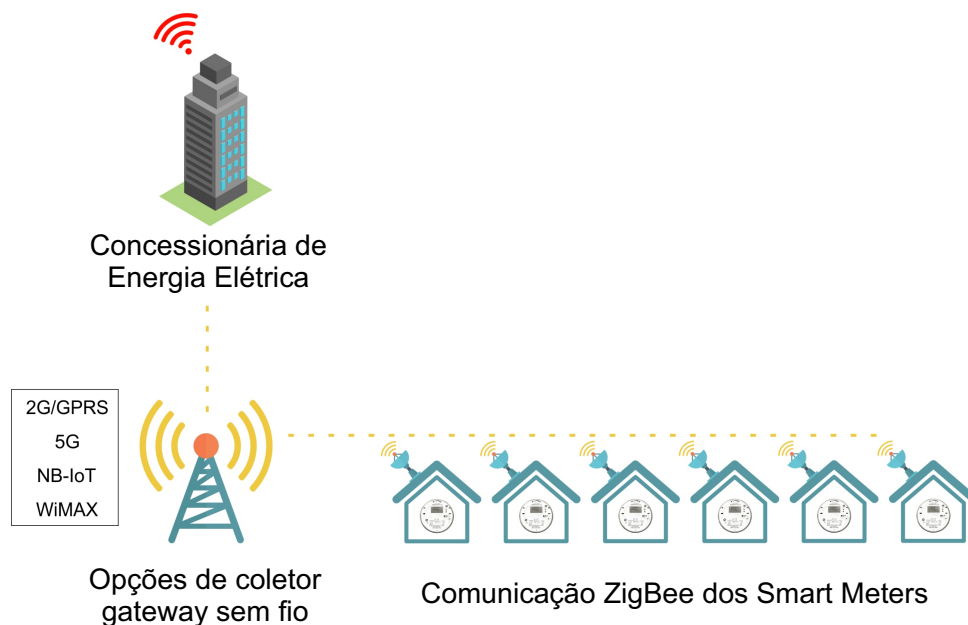


Figura 6 – Infraestrutura de comunicação do AMI

Tabela 6 – Uso dos recursos computacionais na execução do mecanismo proposto.

-	Tempo (ms)	Memória (MB)	Uso de CPU (%)
Exponencial	1.66	$3.84 * 10^{-5}$	3.88
Linear	1.74	$0.96 * 10^{-5}$	5.47
2º Polinomial	2.13	$22.60 * 10^{-5}$	7.02
3º Polinomial	2.60	$25.13 * 10^{-5}$	8.29
Todo o mecanismo	10457.44	0.25	26.99

Dessa forma, os autores deste trabalho acreditam que a implementação do mecanismo adaptativo de compressão de dados nos SMs disponíveis no mercado é viável do ponto de vista computacional.

4.3 Impacto Financeiro

Os dados utilizados no processo de compressão referem-se ao consumo de energia elétrica, sendo este valor de extrema importância no processo de tarifação. Uma vez que o modelo funcional apresenta certo nível de imprecisão, prejuízos para a concessionária ou para o consumidor podem ser obtidos. Para isso, o limiar de erro possui a função de determinar um limite máximo de imprecisão que deve ser aceito, em troca do benefício proporcionado pela redução do fluxo de dados transmitidos pela infraestrutura de comunicação.

Dessa forma, outro experimento analisado refere-se ao impacto financeiro provocado pela diferença entre o valor real coletado pelos SM e o valor recuperado por meio do modelo funcional recebido pela concessionária. Os resultados apresentados na Tabela 7 apresentam

uma média da diferença desses valores reais e recuperados multiplicados pelo valor médio do preço do *kWh* tarifado durante o ano de 2016 (\$ 0.06). Os resultados apresentados demonstram que a imprecisão existente possui pouco impacto financeiramente.

Tabela 7 – Impacto financeiro provocado pela diferença entre valor real coletado pelo SM e o valor calculado pelo modelo funcional para o ano de 2016.

Cidade	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Curitiba	\$ 1.48	\$ 5.66	\$ 6.62	\$ 4.51	\$ 4.51
São Paulo	\$ 0.11	\$ 5.94	\$ 6.78	\$ 5.04	\$ 5.04
Teresina	\$ 1.62	\$ 6.51	\$ 8.29	\$ 4.43	\$ 4.43

Por mais restrito que seja o limiar sempre haverá certo nível de imprecisão, no entanto esse experimento demonstra que o impacto financeiro pode ser desconsiderado, levando em conta os benefícios na redução dos custos associados à infraestrutura de comunicação devido a redução do fluxo de dados trafegados.

4.4 Integração do mecanismo adaptativo ao cenário de DSM

O DSM consiste em um portfolio de medidas/ações pelo lado do consumidor para garantir a eficiência, qualidade e disponibilidade no fornecimento de energia elétrica (MURALITHARAN; SAKTHIVEL; SHI, 2016; NGUYEN; SONG; HAN, 2015). Com as SGs, cada vez mais as propostas de DSM vêm sendo voltadas para ações por parte dos consumidores. Dentre as abordagens propostas na literatura destaca-se o *Home Energy Management System* (HEMS) (MAHAPATRA; MOHARANA; LEUNG, 2017; ZHOU et al., 2016). Importante destacar que a comunicação bidirecional entre a concessionária e os consumidores desempenha papel fundamental, pois viabiliza a criação de novas formas de gerenciar o uso da energia garantindo o equilíbrio entre o fornecimento e o seu consumo (DENG et al., 2015; PALENSKY; DIETRICH, 2011; BENETTI et al., 2016). O desenvolvimento e a implementação de soluções para o problema do gerenciamento pelo lado da demanda necessitam levar em conta o fluxo de dados oriundos de medidores, sensores e controladores espalhados pela rede elétrica e na instalação dos consumidores, as limitações relacionadas à comunicação como por exemplo, largura de banda limitada, protocolos de comunicação, interferência sofrida por tecnologias de comunicação sem fio, etc.

De modo a avaliar a aplicabilidade do mecanismo adaptativo de compressão proposto no cenário de DSM, os autores realizaram uma experimentação considerando a presença de um HEMS desenvolvido por Veras et al. (2018a). O HEMS é constituído basicamente por 03 componentes principais: AMI, SM e controlador de gerenciamento de energia (EMC, *Energy Management Controller*), conforme pode ser visto na Figura 8. O EMC é responsável por determinar a programação otimizada dos aparelhos residenciais considerando os preços da

eletricidade em tempo real (RTP, *Real Time Pricing*) (CORTÉS-ARCOS et al., 2017), bem como as diferentes categorias de home appliances. O modelo de otimização multi-objetivo implementado visa minimizar o custo associado ao consumo de energia elétrica, bem como minimizar a inconveniência (insatisfação/desconforto) dos consumidores finais sujeito a um conjunto de restrições, tais como: limites mínimo e máximo de carga para cada intervalo de tempo; limites de rampa; consumo mínimo relacionado ao horizonte de planejamento; e, restrições operacionais das diferentes categorias de aparelhos residenciais.

A aplicação do EMC resulta em uma mudança no perfil de consumo de energia elétrica, visto que o modelo de otimização implementado realiza um load shifting para minimizar o custo associado ao consumo de energia elétrica e minimizar a inconveniência. Tal mudança pode ser observada na Figura 7 onde o perfil de consumo representado pela linha laranja é modificado após a sugestão da DR para o perfil em azul. Portanto, por meio das experimentações realizadas utilizando os novos perfis de consumo pretende-se avaliar a aplicabilidade do mecanismo de compressão de dados.

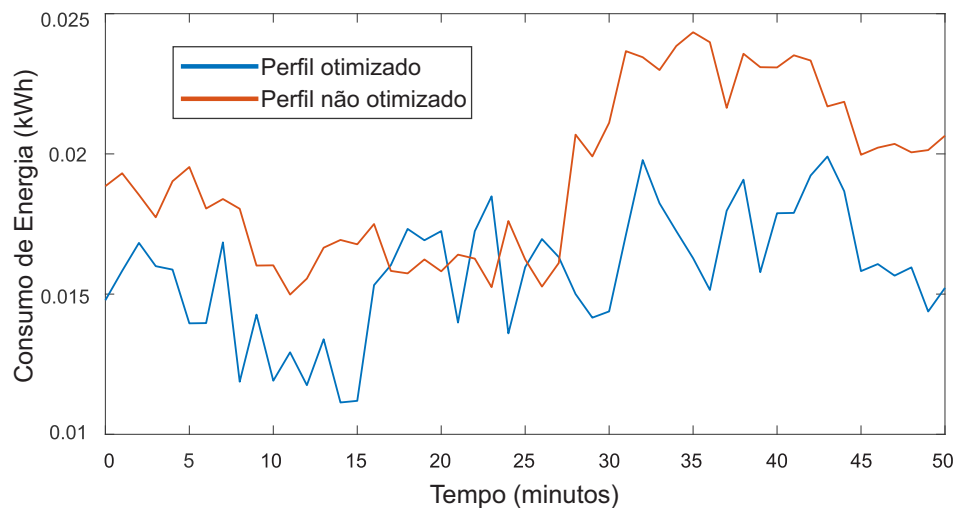


Figura 7 – Perfil de consumo antes e depois da otimização sugerida pelo DR.

Para fins de validação do experimento utilizou-se o perfil 5 (Tabela 3) na cidade de Teresina. A Tabela 8 apresenta os resultados onde os valores obtidos são semelhantes aos valores apresentados nas Tabelas 2 e 3, confirmando que o mecanismo adaptativo proposto é capaz de atuar sem interferir a execução de outros programas disponibilizados ao consumidor no cenário de DSM.

Tabela 8 – Aplicação do mecanismo de compressão adaptativo em um cenário com DR.

Capacidade	Limiar	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	6		0.1751	0.1668	0.1667	0.1667
12		0.0958	0.0836	0.0833	0.0833	0.0833
18		0.0695	0.0559	0.0556	0.0556	0.0556
24		0.0564	0.0421	0.0417	0.0417	0.0417

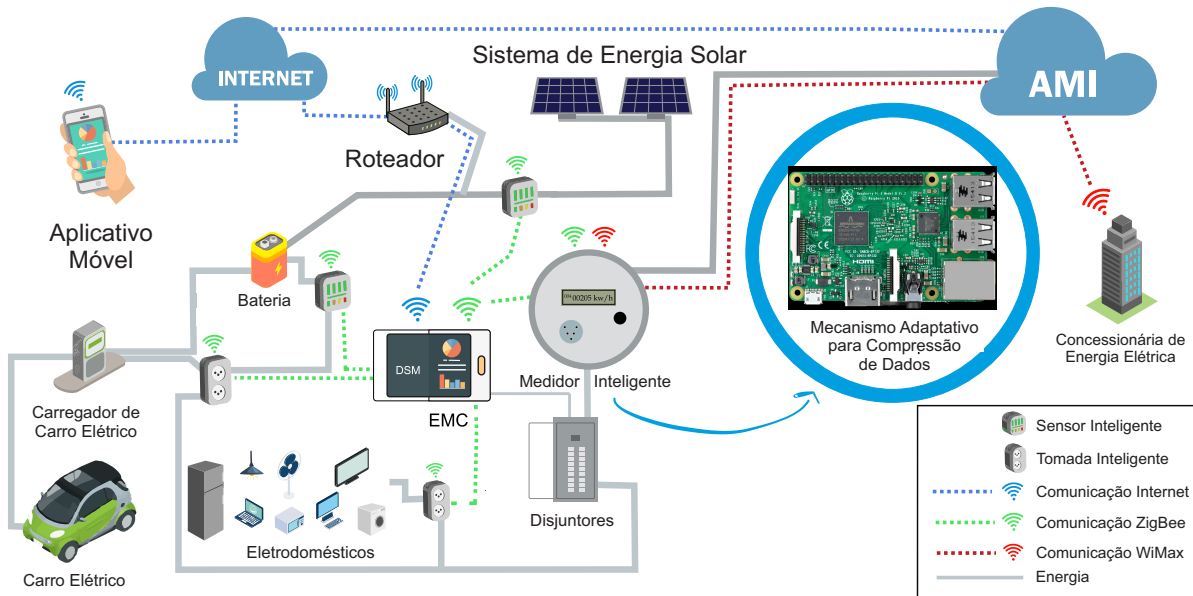


Figura 8 – Infraestrutura de um DSM (Adaptado de (VERAS et al., 2018a)).

Ao submeter as medições ao processo de otimização proposto observou-se uma mudança no perfil de consumo, uma vez que o consumidor em questão passou a utilizar a energia elétrica de forma mais eficiente, visando obter um consumo de energia elétrica que resulte em um menor custo e uma menor insatisfação/inconveniência. Mesmo assim, o experimento realizado mostrou que ao aplicar o mecanismo de compressão de dados com as medições pós otimização foi possível alcançar uma taxa de compressão satisfatória.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho apresenta um mecanismo adaptativo de compressão de dados, baseado em ajuste de curvas com o objetivo de reduzir o volume de dados enviados pelos SMs para a concessionária de energia elétrica. Tal mecanismo faz uso de ajuste de curvas para encontrar, de forma adaptativa em tempo de execução, um modelo funcional, dentre as opções disponíveis, que melhor se adequa às medições de consumo inferidas pelo SM. Os experimentos apresentam taxas de compressão onde os dados recuperados pelo modelo funcional, apesar de apresentarem certo nível de imprecisão, respeitam um limiar de erro preestabelecido. O estudo que avaliou o impacto causado pela imprecisão demonstra que o impacto financeiro provocado chega a ser desprezível em relação ao ganho proporcionado pela redução do volume de dados trafegados pela infraestrutura de comunicação.

O gerenciamento pelo lado da demanda engloba um conjunto de ferramentas e ações com o objetivo principal de garantir o equilíbrio entre o fornecimento e o consumo de energia elétrica, resultando em uma operação mais econômica e confiável do sistema elétrico de potência. Portanto, o gerenciamento pelo lado da demanda deve lidar com os programas de resposta à demanda (baseado no preço ou baseado no incentivo), o consumo de energia elétrica, o conforto do consumidor, o aproveitamento das fontes renováveis, a existência de sistemas de armazenamento de energia, a diversidade de equipamentos elétricos, a qualidade de energia elétrica e o monitoramento das cargas. Simultaneamente, o gerenciamento pelo lado da demanda deve contemplar soluções automáticas, de modo a encorajar a participação dos consumidores ao reduzir a necessidade de intervenção manual.

Desse modo, o consumidor pode implementar na sua residência um conjunto de serviços, os quais tem como objetivo reduzir os custos associados ao consumo e produção de energia elétrica. Baseado no exposto, foi avaliada a aplicabilidade do mecanismo adaptativo de compressão de dados associados ao consumo de energia elétrica considerando a presença de um HEMS. Portanto, por meio de algoritmos de demand response implementados no EMC, observa-se uma mudança no perfil de consumo de energia elétrica (Figura 7). Essa mudança no consumo é resultante de *load shifting*, bem como a operação de energy storage systems e renewable energy resources. Ao implementar o mecanismo adaptativo no HEMS percebe-se que mesmo com a mudança no perfil de consumo, sugerida pelo DR, os resultados obtidos não apresentam valores muito diferentes dos encontrados nos demais experimentos. Logo, pode-se afirmar que a presença do mecanismo de compressão de dados proposto nesse trabalho é perfeitamente adequado para o cenário de DSM.

Por mais que a presença de outliers nas medições coletadas possa prejudicar o desempenho do mecanismo, a utilização da média móvel no pré-processamento dos dados

permite a suavização da possível presença de outliers. Estudos mais aprofundados devem ser realizados para analisar outras formas de tratar os outliers, até mesmo para comparar à técnica utilizada neste trabalho.

O desenvolvimento do mecanismo proposto além de apresentar resultado satisfatório, por apresentar compressão nos diversos cenários simulados, apresenta a possibilidade de ser adaptado para outros contextos, como o de WSN onde o objetivo será maximizar o tempo de vida da rede. Além disso, a aplicação de técnicas de compressão de dados apresentam extrema importância, uma vez que o desenvolvimento de aplicações que envolve tecnologias de IoT cresce consideravelmente ao longo dos anos.

Como trabalhos futuros, pretende-se implementar testes mais próximos da realidade onde seja possível analisar, não apenas a quantidade de dados reduzidos, mas também aspectos relacionados ao fluxo de dados na rede, análise de latência, taxa de perda de pacotes, etc. Nesse cenário a implementação de um cenário prático será proposta levando em consideração o DSM onde outros programas, tais como resposta a demanda, monitoramento de carga, detecção e classificação de distúrbios sejam utilizados.

Além disso outros tipos de funções podem ser analisados com o objetivo de fornecer mais opções ao escolher um modelo funcional que melhor represente o comportamento de consumo. Um estudo para análise e detecção de dados discrepantes mais detalhado também faz-se necessário uma vez que a presença desses pode prejudicar o desempenho do mecanismo.

Referências

- AALAMIFAR, F. et al. Optimized WiMAX Profile Configuration for Smart Grid Communications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Publisher, v. 8, n. 6, p. 2723–2732, Nov 2017. ISSN 1949-3053. Citado na página 2.
- AERNOUTS, M. et al. Sigfox and lorawan datasets for fingerprint localization in large urban and rural areas. *Data*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 2, p. 13, 2018. Citado na página 2.
- AFSAR, M. M.; TAYARANI-N, M.-H. Clustering in sensor networks: A literature survey. *Journal of Network and Computer Applications*, Academic Press, v. 46, p. 198–226, Nov 2014. ISSN 1084-8045. Citado na página 9.
- AHMAD, S. et al. A compendium of performance metrics, pricing schemes, optimization objectives, and solution methodologies of demand side management for the smart grid. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 10, p. 2801, 2018. Citado na página 5.
- AL-TURJMAN, F.; ABUJUBBEH, M. Iot-enabled smart grid via sm: An overview. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- AL-WAKEEL, A.; WU, J.; JENKINS, N. State estimation of medium voltage distribution networks using smart meter measurements. *Applied energy*, Elsevier, v. 184, p. 207–218, 2016. Citado na página 4.
- ALAHAKOON, D.; YU, X. Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 12, n. 1, p. 425–436, Feb 2016. ISSN 1551-3203. Citado na página 4.
- ALONSO-ROSA, M. et al. Novel internet of things platform for in-building power quality submetering. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 8, p. 1320, 2018. Citado na página 1.
- AMAN, S.; SIMMHAN, Y.; PRASANNA, V. K. Energy management systems: state of the art and emerging trends. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 51, n. 1, p. 114–119, 2013. Citado na página 4.
- ANDREADOU, N.; GUARDIOLA, M.; FULLI, G. Telecommunication technologies for smart grid projects with focus on smart metering applications. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 5, p. 375, 2016. Citado na página 2.
- ARAÚJO, P. R. C. de et al. A Middleware for the Integration of Smart Grid Elements with WSN Based Solutions. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications, v. 10, n. 12, p. 506203, Dec 2014. ISSN 1550-1477. Citado na página 7.
- ARDUINO. *Arduino*. 2018. <<https://www.arduino.cc/>>. [Online; accessed 24-December-2018]. Citado na página 21.
- AVANCINI, D. B. et al. Energy meters evolution in smart grids: A review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 2019. Citado na página 4.

BAETS, L. D. et al. Detection of unidentified appliances in non-intrusive load monitoring using siamese neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 104, p. 645–653, 2019. Citado na página 4.

BALAKRISHNA, P. et al. Analysis on AMI system requirements for effective convergence of distribution automation and AMI systems. *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, Publisher, p. 1–7, Dec 2014. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 7.

BARRERO, F. et al. Networked electronic equipments using the iee 1451 standard—visioway: a case study in the its area. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 8, n. 4, p. 467124, 2012. Citado na página 2.

BENETTI, G. et al. Electric load management approaches for peak load reduction: A systematic literature review and state of the art. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, v. 20, p. 124–141, 2016. Citado na página 24.

BORGES, F. A. et al. Feature extraction and power quality disturbances classification using smart meters signals. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 12, n. 2, p. 824–833, 2016. Citado na página 4.

CAPO-CHICHI, E. P. et al. K-RLE: A New Data Compression Algorithm for Wireless Sensor Network. *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*, Publisher, p. 502–507, Jun 2009. Citado na página 9.

CARVALHO, C. et al. Improving prediction accuracy for wsn data reduction by applying multivariate spatio-temporal correlation. *Sensors*, v. 11, n. 11, p. 10010–10037, 2011. Citado na página 9.

CARVALHO, C. G. N. D. et al. Multiple linear regression to improve prediction accuracy in wsn data reduction. In: IEEE. *2011 7th Latin American Network Operations and Management Symposium*. [S.l.], 2011. p. 1–8. Citado na página 9.

CHERNYSHEV, M. et al. Internet of things (iot): research, simulators, and testbeds. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1637–1647, 2018. Citado na página 21.

CLEMENTS, A. F.; MCCULLOCH, M. D.; NIXON, K. J. Low-loss, high-compression of energy profiles. In: IEEE. *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. [S.l.], 2015. p. 949–953. Citado na página 9.

COLLIER, S. E. The emerging enernet: Convergence of the smart grid with the internet of things. *IEEE Industry Applications Magazine*, IEEE, v. 23, n. 2, p. 12–16, 2017. Citado na página 2.

CORTÉS-ARCOS, T. et al. Multi-objective demand response to real-time prices (rtp) using a task scheduling methodology. *Energy*, Elsevier, v. 138, p. 19–31, 2017. Citado na página 25.

DAKI, H. et al. Big Data management in smart grid: concepts, requirements and implementation. *Journal of Big Data*, Springer International Publishing, v. 4, n. 1, p. 13, Apr 2017. ISSN 2196-1115. Citado na página 4.

- DARYAPURKAR, R.; KARANDIKAR, R. Wimax for data aggregation in smart grid communication network—a review. In: IEEE. *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*. [S.l.], 2017. p. 97–100. Citado na página 2.
- DENG, R. et al. A survey on demand response in smart grids: Mathematical models and approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 570–582, 2015. Citado na página 24.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power System Quality*. [S.l.]: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2012. ISBN 9780070264625. Citado na página 7.
- EICHINGER, F. et al. A time-series compression technique and its application to the smart grid. *The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases*, Springer-Verlag New York, Inc., v. 24, n. 2, p. 193–218, 2015. Citado na página 9.
- EMMANUEL, M.; RAYUDU, R. Communication technologies for smart grid applications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, Academic Press, v. 74, p. 133–148, Oct 2016. ISSN 1084-8045. Citado na página 2.
- ESPRESSIF. *Espressif Systems*. 2018. <<https://www.espressif.com/>>. [Online; accessed 20-December-2018]. Citado na página 21.
- FADLULLAH, Z. M. et al. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 49, n. 4, 2011. Citado na página 2.
- FAHEEM, M. et al. Smart grid communication and information technologies in the perspective of industry 4.0: Opportunities and challenges. *Computer Science Review*, Elsevier, v. 30, p. 1–30, 2018. Citado na página 1.
- FLINN, D. J.; DUGAN, R. C. A database for diverse power system simulation applications. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 2, p. 784–790, 1992. Citado na página 4.
- GANDOMAN, F. H. et al. Review of facts technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 82, p. 502–514, 2018. Citado na página 1.
- GUNDUZ, M. Z.; DAS, R. A comparison of cyber-security oriented testbeds for iot-based smart grids. In: IEEE. *2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado na página 21.
- HEMMATI, R.; SABOORI, H. Stochastic optimal battery storage sizing and scheduling in home energy management systems equipped with solar photovoltaic panels. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 152, p. 290–300, 2017. Citado na página 5.
- HUFFMAN, D. A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proceedings of the IRE*, IEEE, v. 40, n. 9, p. 1098–1101, Sep 1952. ISSN 0096-8390. Citado na página 8.
- INDHUMATHI, T. C. et al. Comparison and performance analysis of clustering protocol using sleep&wakeup technique in WSN. *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, Publisher, p. 667–672, May 2014. Citado na página 9.

- INMET. Temperatura média anual. Dec. 2018. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 18.
- ISLAM, M. et al. Performance analysis of AMI distributed area network using WiMAX technology. *2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Publisher, p. 152–155, Oct 2014. Citado na página 2.
- KABALCI, Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Pergamon, v. 57, p. 302–318, May 2016. ISSN 1364-0321. Citado na página 7.
- KABALCI, Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 57, p. 302–318, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.
- KAPPAGANTU, R.; DANIEL, S. A. Challenges and issues of smart grid implementation: A case of indian scenario. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Elsevier, v. 5, n. 3, p. 453–467, 2018. Citado na página 1.
- KHAN, A. R. et al. Load forecasting, dynamic pricing and dsm in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 54, p. 1311–1322, 2016. Citado na página 5.
- KIM, J. et al. An iot-based home energy management system over dynamic home area networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 11, n. 10, p. 828023, 2015. Citado na página 2.
- LARIOS, D. et al. Implementing a distributed wsn based on ipv6 for ambient monitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 9, n. 6, p. 328747, 2013. Citado na página 2.
- LAURINEC, P.; LUCKÁ, M. New clustering-based forecasting method for disaggregated end-consumer electricity load using smart grid data. *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics*, IEEE, p. 210–215, Nov 2017. Citado na página 4.
- LEE, S.-H.; YANG, C.-S. An intelligent power monitoring and analysis system for distributed smart plugs sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications, v. 13, n. 7, p. 1550147717718462, Jul 2017. ISSN 1550-1477. Citado na página 2.
- LEMOS, M. et al. An energy-efficient approach to enhance virtual sensors provisioning in sensor clouds environments. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 3, p. 689, 2018. Citado na página 9.
- LIU, Y. Wireless Sensor Network Applications in Smart Grid: Recent Trends and Challenges. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications, v. 8, n. 9, p. 492819, Sep 2012. ISSN 1550-1477. Citado na página 7.
- LIU, Y. et al. Admittance-based load signature construction for non-intrusive appliance load monitoring. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 171, p. 209–219, 2018. Citado na página 4.

- MACEDO, M. N. Q. et al. Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 41, p. 128–133, 2015. Citado na página 4.
- MAHAPATRA, C.; MOHARANA, A. K.; LEUNG, V. Energy management in smart cities based on internet of things: Peak demand reduction and energy savings. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 12, p. 2812, 2017. Citado na página 24.
- MARTÍN, C.; DÍAZ, M.; RUBIO, B. Run-time deployment and management of coap resources for the internet of things. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 13, n. 3, p. 1550147717698969, 2017. Citado na página 2.
- MATLAB. *MATLAB - MathWorks*. 2019. [Online; accessed 02. Apr. 2019]. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Citado na página 20.
- MATLAB. *Moving average - MATLAB tsmovavg*. 2019. [Online; accessed 02. Apr. 2019]. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/finance/tsmovavg.html>>. Citado na página 20.
- MCNEIL, M. A.; KARALI, N.; LETSCHERT, V. Forecasting indonesia’s electricity load through 2030 and peak demand reductions from appliance and lighting efficiency. *Energy for Sustainable Development*, Elsevier, v. 49, p. 65–77, 2019. Citado na página 1.
- MIGUEL, M. L. F. et al. A Power Planning Algorithm Based on RPL for AMI Wireless Sensor Networks. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 4, p. 679, Mar 2017. ISSN 1424-8220. Citado na página 2.
- MIRAZ, M. et al. Internet of nano-things, things and everything: future growth trends. *Future Internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 8, p. 68, 2018. Citado na página 2.
- MOHASSEL, R. R. et al. A survey on Advanced Metering Infrastructure. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 63, p. 473–484, Dec 2014. ISSN 0142-0615. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 7.
- MURALITHARAN, K.; SAKTHIVEL, R.; SHI, Y. Multiobjective optimization technique for demand side management with load balancing approach in smart grid. *Neurocomputing*, Elsevier, v. 177, p. 110–119, 2016. Citado na página 24.
- NGUYEN, H. K.; SONG, J. B.; HAN, Z. Distributed demand side management with energy storage in smart grid. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, IEEE, v. 26, n. 12, p. 3346–3357, 2015. Citado na página 24.
- NI, F. et al. Three-phase state estimation in the medium-voltage network with aggregated smart meter data. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 98, p. 463–473, Jun 2018. ISSN 0142-0615. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 7.
- OLIVEIRA, L. et al. Performance Assessment of LoRa and Sigfox Protocols with Mobility Support (Accepted for publication.). *International Journal of Communication Systems*, 2019. Citado na página 2.

- PALENSKY, P.; DIETRICH, D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE transactions on industrial informatics*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 381–388, 2011. Citado na página 24.
- PARMAR, K.; JINWALA, D. C. Concealed data aggregation in wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Comput. Networks*, Elsevier, v. 103, p. 207–227, Jul 2016. ISSN 1389-1286. Citado na página 8.
- PATTAR, S. et al. Searching for the iot resources: Fundamentals, requirements, comprehensive review and future directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2018. Citado na página 5.
- PAWAR, S. et al. Smart electricity meter data analytics: A brief review. *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, Publisher, p. 1–5, Jul 2017. Citado na página 7.
- PFLUGRADT, N. D. Modellierung von wasser und energieverbräuchen in haushalten. 2016. Citado na página 17.
- RAMÍREZ, D. F.; CÉSPEDES, S. Routing in Neighborhood Area Networks: A survey in the context of AMI communications. *Journal of Network and Computer Applications*, Academic Press, v. 55, p. 68–80, Sep 2015. ISSN 1084-8045. Citado na página 2.
- RAZAVI, R. et al. Occupancy detection of residential buildings using smart meter data: A large-scale study. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 183, p. 195–208, 2019. Citado na página 4.
- RINGWELSKI, M. et al. The Hitchhiker’s guide to choosing the compression algorithm for your smart meter data. *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, IEEE, p. 935–940, Sep 2012. Citado na página 8.
- SALMAN, O. et al. IoT survey: An SDN and fog computing perspective. *Comput. Networks*, Elsevier, v. 143, p. 221–246, Oct 2018. ISSN 1389-1286. Citado na página 2.
- SANCHEZ-HIDALGO, M.-A.; CANO, M.-D. A survey on visual data representation for smart grids control and monitoring. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Elsevier, 2018. Citado na página 1.
- SEIJO, M. et al. Planning and performance challenges in power line communications networks for smart grids. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Hindawi Publishing Corp., v. 2016, p. 28, 2016. Citado na página 2.
- SERRANO, M. et al. Fiestaiot project: Federated interoperable semantic iot/cloud testbeds and applications. In: INTERNATIONAL WORLD WIDE WEB CONFERENCES STEERING COMMITTEE. *Companion of the The Web Conference 2018 on The Web Conference 2018*. [S.l.], 2018. p. 425–426. Citado na página 21.
- SUN, W.; WANG, J. Cross-Layer QoS Optimization of Wireless Sensor Network for Smart Grid. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications, v. 10, n. 12, p. 327067, Dec 2014. ISSN 1550-1477. Citado na página 7.
- TONG, X.; KANG, C.; XIA, Q. Smart metering load data compression based on load feature identification. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 7, n. 5, p. 2414–2422, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

- TONYALI, S. et al. A scalable protocol stack for IEEE 802.11s-based advanced metering infrastructure networks. *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Publisher, p. 1–6, Jan 2018. ISSN 2331-9860. Citado na página 2.
- TU, C. et al. Big data issues in smart grid—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 79, p. 1099–1107, 2017. Citado na página 2.
- UTHAYAKUMAR, J.; VENGATTARAMAN, T.; DHAVACHELVAN, P. A survey on data compression techniques: From the perspective of data quality, coding schemes, data type and applications. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Elsevier, May 2018. ISSN 1319-1578. Citado na página 8.
- UTHAYAKUMAR, J.; VENGATTARAMAN, T.; DHAVACHELVAN, P. A new lossless neighborhood indexing sequence (nis) algorithm for data compression in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 83, p. 149–157, 2019. Citado na página 8.
- VELOSO, A. F. D. S. et al. An IoT Smart Metering Solution Based on IEEE 802.15.4. *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, p. 1–6, Dec 2018. ISSN 2576-6813. Citado na página 4.
- VERAS, J. et al. A multi-objective demand response optimization model for scheduling loads in a home energy management system. *Sensors*, v. 18, n. 10, p. 3207, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 13, 1, 24 e 26.
- VERAS, J. M. et al. Towards the Handling Demand Response Optimization Model for Home Appliances. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 3, p. 616, Mar 2018. ISSN 2071-1050. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 17.
- WANG, A. L. et al. Non-intrusive load monitoring algorithm based on features of v–i trajectory. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 157, p. 134–144, 2018. Citado na página 4.
- WANG, W.; LU, Z. Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. *Computer Networks*, Elsevier, v. 57, n. 5, p. 1344–1371, Apr 2013. ISSN 1389-1286. Citado na página 4.
- WANG, Y. et al. Clustering of electricity consumption behavior dynamics toward big data applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 7, n. 5, p. 2437–2447, 2016. Citado na página 9.
- WELCH; WELCH. A Technique for High-Performance Data Compression. *Computer*, Publisher, v. 17, n. 6, p. 8–19, Jun 1984. ISSN 0018-9162. Citado na página 8.
- WEN, L. et al. Compression of smart meter big data: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 91, p. 59–69, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 8.
- WU, M.; TAN, L.; XIONG, N. Data prediction, compression, and recovery in clustered wireless sensor networks for environmental monitoring applications. *Information Sciences*, Elsevier, v. 329, p. 800–818, 2016. Citado na página 8.
- ZHANG, Y. et al. Privacy-preserving communication and power injection over vehicle networks and 5g smart grid slice. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 122, p. 50–60, 2018. Citado na página 2.

ZHOU, B. et al. Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 61, p. 30 – 40, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116002823>>. Citado na página 24.