

Wireless Network Technologies for Smart Homes: A Technical and Economic Analysis

M. M. Amoroso, R. Moraes, G. M. de Araujo, V. S. Rodrigues

Abstract—The Smart Grid concept is being implemented and it is a close reality, its application has been accelerated by the reduction of the electronic component's costs, the Internet of Things evolution and the necessity to develop more efficient solutions for electric vehicles and distributed generation. The main projects around the world are starting with the implementation of Smart Homes, due to the greater easy technical solution and high compensation. These implementations are accompanied by technical and economic barriers, due to the increase in data generation and the increase products price. This paper focuses on the study of the Sub-GHz, WiFi, and ZigBee wireless networks, making a technical and economic analysis of these networks. Experimental and simulation analysis were used to evaluate these technologies, allowing to simulate a complete Smart Home environment for energy and demand management, applying a communication node for each energy point. The economic analysis relates the direct cost of technology module and their energy consumption, based on rates from the local distributor of the residence. In conclusion, the document establishes the best wireless technology to apply in energy and demand management in smart homes environments, with higher transmission success rates and better cost benefit.

Index Terms—Economical and Technical Analyze, IoT, Smart Grid, Smart Home, and Wireless Technologies.

I. INTRODUÇÃO

O sistema Interligado Nacional (SIN) foi implementado no Brasil em 1998. É um padrão que satisfaz com eficiência a distribuição de energia no modo convencional pelo território [1]. O SIN engloba a geração, transmissão, distribuição e o consumo. E no modo tradicional o fluxo de energia é unidirecional partindo da geração até os consumidores.

Com o passar do tempo, há um anseio por soluções mais eficientes e controladas em todas as áreas, não sendo diferente no SIN. Uma resposta a essa tendência é a implementação de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) em todas as esferas do SIN [2]. Essa integração entre Sistema de Energia e TICs cria o conceito da Smart Grid, esse novo modelo é capaz de garantir um fluxo de energia bidirecional, permitindo o controle ativo sobre a rede e integrando totalmente as fontes de energia [2].

A implementação de uma Smart Grid só pode ser garantida através de uma moderna infraestrutura de comunicação digital que conecta fornecedores, consumidores e prestadores de serviços do SIN. Criando uma transparência de informações, atuações mais rápidas no controle, monitoramento e sensoria-mento inteligente em tempo real [3], [4].

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal de Santa Catarina.

A implementação das TICs no SIN cria áreas denominadas como: *Smart Generation*, *Smart Transmission*, *Smart Distribution* e *Smart Home* (SH). Esse novo modelo do Sistema de Energia possui ganhos relevantes, mas é no âmbito do consumo que se percebe a maior contribuição [5]. Isso é comprovado pelo foco dos artigos científicos e projetos pilotos focados em SH. Em [6] destaca-se que dez dos dezesseis programas pilotos no Brasil são direcionados para os consumidores.

As soluções implementadas na SH transcendem as aplicações voltadas para a área da energia elétrica, mais especificamente medição, gerenciamento e controle de cargas/demanda. Existem quatro macro grupos que são abrangidos pelo conceito de SH: saúde, gerenciamento de energia, segurança e entretenimento [7]. A Fig. 1 apresenta as redes que atendem cada área, o fluxo da informação, os grupos atendidos e as possibilidades criadas de implementação. Este artigo aborda, principalmente, o gerenciamento de energia e suas aplicações.

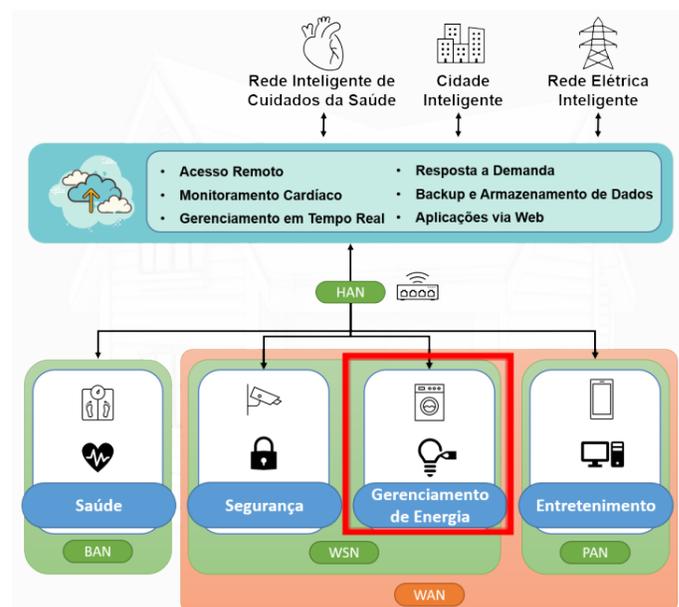


Fig. 1. Os quatro pilares da SH [Adaptado de [7]].

As TICs trazem muitas vantagens ao sistema elétrico. Entretanto, os ganhos só são possíveis se uma infraestrutura de comunicação sólida e de qualidade for implementada. Isso envolve um estudo técnico e econômico em todas as camadas da rede a ser utilizada. O grande desafio está na quantidade de tráfego de dados gerado, pois, prevê-se a inclusão de bilhões

de dispositivos à Internet, acelerada pela popularização da IoT¹ (*Internet of Things*) [8].

Atualmente, a atenção da comunidade científica e industrial está muito direcionada na melhoria das tecnologias de redes e no tratamento desse volume de dados.

Este artigo tem como principal objetivo a análise de tecnologias de redes sem fio para utilização numa SH, tendo como aplicação alvo um sistema de controle e gerenciamento de energia.

Apesar de existirem diversas soluções candidatas a serem utilizadas neste processo, as análises encontradas na literatura são fundamentadas somente em dados técnicos teóricos. A principal contribuição desse artigo está relacionada com a análise de tecnologias de rede sem fio através de um estudo experimental complementado por uma análise por simulação. Os dados do experimento real são utilizados para a validação de um modelo de simulação. No modelo de simulação é analisado um cenário com a quantidade real de pontos de monitoramento de uma SH, enfatizando-se as limitações das tecnologias analisadas.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos relacionados foram selecionados através de uma revisão sistemática da literatura, pesquisando-se artigos nas principais bases de dados da área, IEEE Xplore, Science Direct e Periódicos CAPES. A Fig. 2 apresenta o processo completo da busca e a expressão utilizada.

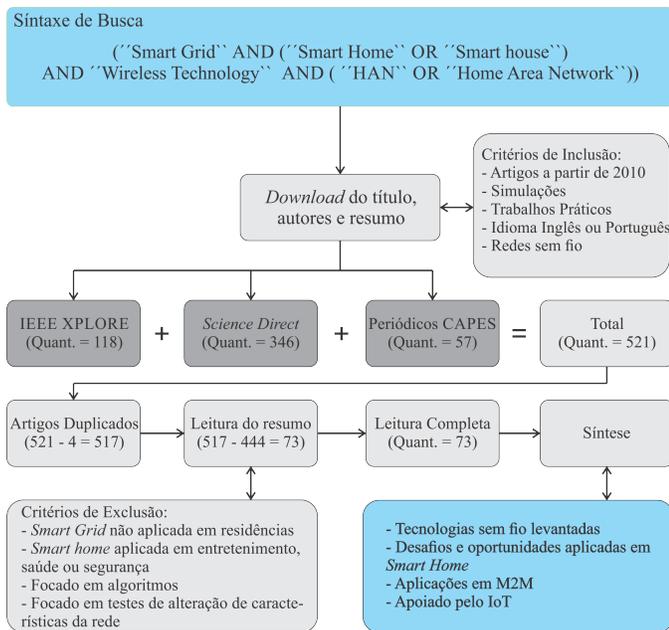


Fig. 2. Fluxograma de pesquisa dos trabalhos relacionados.

Após a busca e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, restaram setenta e três trabalhos para leitura completa e realização das sínteses, concluiu-se que os trabalhos podem ser divididos em três categorias de análise:

- 1) Redes sem fio padronizadas pelo IEEE(802.11 e 802.15.4).
- 2) Redes sem fio com protocolos proprietários.
- 3) Definições sobre *smart homes*, desafios, barreiras e oportunidades.

Os protocolos proprietários estão focados no desenvolvimento de soluções específicas para *smart homes* (SHs), porém o tempo de vida das tecnologias, o elevado custo e a falta de padronização dificultam sua perpetuação. As principais redes sem fio nessa categoria operam nas bandas de 2,4 GHz e Sub-GHz [9], [10], [11], [12].

Mahmood et al. [9] apresentam um comparativo entre diversas tecnologias de redes para SHs, destacando-se, entre elas, as soluções baseadas no WiFi e ZigBee, destacando maiores vantagens de uso do ZigBee para aplicações de gerenciamento de energia, por ter menor consumo de energia e suportar um número elevado de nodos na rede.

Em [13], aponta-se que as principais soluções para uma completa integração na SH estão nas redes sem fio, destacando as seguintes tecnologias: ZigBee, WiFi, Bluetooth, Sub-GHz, 6LowPan, EnOcean e Wave2m. De acordo com [2], as melhores tecnologias para aplicações de SH são ZigBee, Sub-GHz, WiFi, Z-Wave e M-bus. Enquanto que para [14] existe uma necessidade de convergência para um protocolo comum, garantindo a interoperabilidade e evolução.

A primeira parte da revisão da literatura foi utilizada para verificar quais são as tecnologias de redes mais promissoras para as SHs, concluindo que as tecnologias WiFi (IEEE 802.11) e ZigBee (IEEE 802.15.4) são as mais abordadas no contexto das redes sem fio padronizadas, porém, também observou-se que a tecnologia Sub-GHz destaca-se entre as redes sem fio com protocolos proprietários. Os rádios WiFi e ZigBee operam na banda de 2,4 GHz, desta forma a análise do Sub-GHz, justifica-se também, pela análise de uma tecnologia que funciona em uma frequência diferente. É importante ressaltar que há um esforço recente na integração de tecnologias de redes sem fio locais com redes de longa distância [15], [16].

Com relação a estudos experimentais das tecnologias supracitadas, destaca-se que em [17] foi construída uma maquete de uma SH, com finalidades de pesquisa e educação, utilizando as tecnologias ZigBee e WiFi para a comunicação e o controle dos nodos. Em [18], um *smart meter* foi implementado utilizando uma rede ZigBee para validar os ganhos de uma aplicação SH. Em [19], uma *smart grid* foi implementada no campus de uma universidade, onde uma rede mesh baseada no padrão IEEE 802.15.4 foi a tecnologia de comunicação escolhida.

Em [20], uma rede de sensores para o gerenciamento de energia em uma SH foi implementada utilizando a tecnologia IEEE 802.11. Um estudo de caso de uma SH com rede M2M (Machine-to-Machine) também utilizando o WiFi, para aumento da eficiência energética, é apresentado em [21]. Um estudo de caso com um medidor inteligente para uso geral em SH, utilizando a tecnologia WiFi para a comunicação, é discutido em [22].

O principal diferencial da análise apresentada neste artigo, em comparação ao estado da arte, está na avaliação das

¹Conectar qualquer corpo à internet, seja um produto, um animal, uma pessoa, literalmente qualquer coisa

tecnologias de rede sem fio operando num cenário real (estudo experimental), complementado de uma análise por simulação. Pois, os trabalhos correlatos analisam experimentalmente somente uma tecnologia de rede separadamente ou a comparação é realizada para outras aplicações, porém, a ampla maioria dos estudos é conduzido através de análise teóricas/simulação.

III. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o detalhamento do planejamento da pesquisa, demonstrando cada etapa executada do trabalho.

A. Pacote de Dados – Primeira Análise

Conhecer quais informações serão transmitidas é de suma importância para a análise das tecnologias de redes sem fio, sendo necessário definir o formato do pacote de dados.

Logo, visto que esse trabalho pretende analisar as tecnologias de redes sem fio voltadas para aplicações em SH, optou-se pela escolha de um padrão baseado em uma aplicação de gerenciamento e medição de cargas elétricas, que é o principal foco deste trabalho. O tamanho do pacote de dados varia de acordo com o cabeçalho da tecnologia em análise, permanecendo inalterado o campo dos dados.

Baseado na ficha técnica de um circuito integrado utilizado para medição de energia elétrica (ADE7753) foi estabelecido o tamanho do pacote de dados [23]. Para uma medição básica de energia (comum aos consumidores residenciais), onde ocorre apenas a medição da energia ativa, o componente nos apresenta um registrador de 24 bits, ou 3 bytes. Optou-se por uma medição mais completa, pois todas as tecnologias escolhidas possuem capacidade de banda. Será mensurado então: corrente eficaz, tensão eficaz e energia ativa. Essas três informações somadas possuem 72 bits, ou 9 bytes.

Em [13] é apresentado um exemplo com um pacote de 65 bytes para o transporte das informações de um relógio medidor monofásico, isso incluindo o cabeçalho de informação da tecnologia selecionada.

Com o intuito de expandir os testes, serão realizados experimentos com pacotes maiores, logo optou-se por trabalhar com dados de 20, 40 e 60 bytes.

B. Tempo de Envio – Segunda análise

Entende-se que para uma função de controle o intervalo de transmissão deve ser reduzido, para diminuir o atraso entre o comando e a ação.

Conforme [14], existem alguns modelos de aplicação para uso doméstico, como: Sistemas seguros, Sistemas reguladores em malha fechada, Sistema supervisor em malha fechada, Sistema de controle em malha aberta, Sistema de alerta e Sistema centralizador de informação.

A aplicação de gerenciamento de demanda e energia é classificada como um sistema de controle em malha aberta. Nessa classe são necessárias a execução de eventos com tempos na casa de centenas de milissegundos [24].

A necessidade de um controle num período menor aumenta a taxa de transmissão dos dados, então define-se como um tempo plausível de envio o valor de 500 ms.

C. Cenários

O cenário foi escolhido de forma a representar a maioria das residências brasileiras, permitindo assim, concluir qual solução terá o melhor desempenho dentro de uma SH.

Em [25] foi apresentado um estudo estatístico realizado em São Paulo, a maior cidade da América Latina, onde as residências foram divididas em seis grupos. Os dois grupos que abrangem as maiores residências da cidade representam apenas 3% e tem uma área construída maior que 130 m^2 . A residência escolhida para os testes possui 125 m^2 e está no grupo imediatamente abaixo do citado anteriormente (entre 86 m^2 e 130 m^2), portanto, 97% das residências da cidade estão nos grupos com área menor ou igual a 130 m^2 .

A residência real escolhida para a realização do experimento tem desenho arquitetônico da Fig. 3. A simulação será realizada utilizando a mesma casa como cenário.

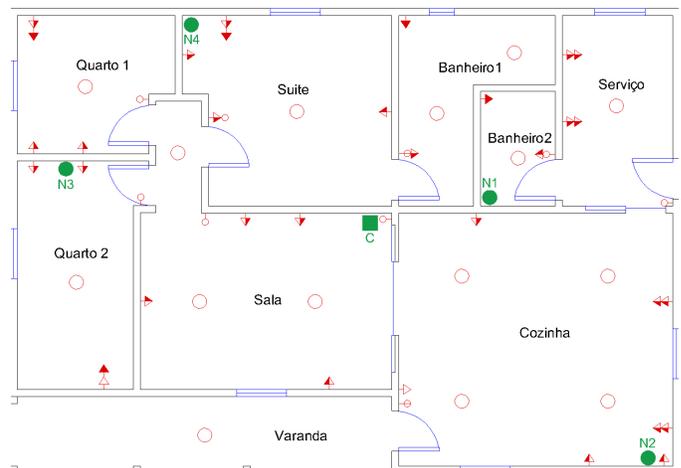


Fig. 3. Planta baixa com localização dos pontos elétricos e dos nodos de teste.

Destaca-se que uma residência com área maior exige mais das tecnologias de rede sem fio, pois aumenta o número de nodos da rede e a distância entre os pontos de monitoramento e o coordenador.

É importante mencionar que os pontos de monitoramento (tomadas, iluminação e interruptores) representam os pontos reais de energia desta residência, a qual teve o seu projeto elétrico executado de acordo com a norma NBR 5410:2014 [26]. A quantidade é definida pela área e perímetro dos cômodos. Logo, nesta residência, há 47 nodos de comunicação, somatório dos pontos de tomada e iluminação. O levantamento foi realizado considerando o número mínimo de pontos por cômodos e tomadas de uso especial dos equipamentos mais comuns, como: chuveiros elétricos, torneiras elétricas e ares-condicionados. Na iluminação foi considerado como ponto de comunicação as luminárias, pois percebe-se um padrão de comercialização de lâmpadas inteligentes e utilização de interruptores comuns.

Definidas as tecnologias de redes sem fio, o cenário, o tamanho do pacote e o tempo de transmissão é possível iniciar os testes, que são apresentados nas próximas seções.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizadas duas análises: técnica e econômica. O experimento foi utilizado para depuração da simulação computacional. A análise econômica correlaciona os custos diretos de módulos comerciais e consumo de energia.

A. Experimento

A análise experimental foi realizada em uma residência comum, onde um experimento de comunicação entre 5 pontos, organizados em topologia estrela, foi realizado. Neste experimento, há um coordenador (C), e quatro nodos clientes (N1, N2, N3 e N4). O coordenador fica localizado mais no centro da residência, representado pelo quadrado em verde na Fig. 3. Enquanto os clientes ficam posicionados pela residência como se fossem produtos inteligentes de uma SH, identificados pelos círculos verdes (Fig. 3).

O módulo de comunicação Sub-GHz utilizado foi o HC-12, um modelo com antena externa em formato de mola. Essa solução possui um alcance de até 1000 m em campo aberto e possibilita a comunicação a uma taxa de 236 kbps. Sua frequência de operação está na banda de 433,4 MHz à 473 MHz, com 100 canais individuais [27]. Este possui um microcontrolador interno dedicado exclusivamente para a função de comunicação e a configuração é realizada através de comandos AT, podendo definir parâmetros como potência de transmissão, canal de comunicação, taxa de baudrate e o modo de transferência serial.

A tecnologia WiFi foi implementada com os módulos ESP 8266, no modelo ESP-07. Essa solução opera em 2,4 GHz no padrão IEEE 802.11 b/g/n, com a pilha de protocolos TCP/IP já implementada. A placa possui um microcontrolador de 32 bits que permite gerenciar saídas/entradas digitais e analógicas, porém essa função não foi utilizada. A antena é cerâmica interna ao módulo e nenhum raio de alcance foi citado pelo fabricante [28]. Nos módulos foram instalados firmwares do modelo AT.

Os testes com a tecnologia ZigBee foram realizados utilizando módulos Xbee da série dois, do fabricante Digi International. O rádio possui microcontrolador que gerencia a comunicação com uma pilha de protocolos interna, definida no padrão IEEE 802.15.4 na configuração realizada pelo software XCTU. É possível controlar saídas/entradas digitais e analógicas. Esses módulos têm uma área de cobertura de 40 m para aplicações internas e a antena é externa. A taxa máxima de transmissão é de 250 kbps e possui baixo consumo de energia [29]. A Fig. 4 apresenta fotos dos módulos utilizados no experimento.

Os testes foram realizados conforme o fluxograma de programação resumido, apresentado na Fig. 5.

A taxa de sucesso média, obtida com a transmissão de pacotes de 20 B, foi de 88,36% para o Sub-GHz, 93,91% para o WiFi e 99,87% para o ZigBee.

Com o aumento do pacote para 40 B, a rede WiFi e ZigBee apresentam redução da taxa de sucesso para 81,13% e 91,64%, respectivamente. Enquanto o Sub-GHz obteve resultado muito similar ao anterior (89,08%). Para testes com pacote de 60 B, os resultados do Sub-GHz apresentaram um pequeno declínio



Fig. 4. A primeira imagem demonstra o teste com módulos Sub-GHz, a segunda com WiFi, a terceira com ZigBee e a quarta um nodo WiFi durante o experimento.

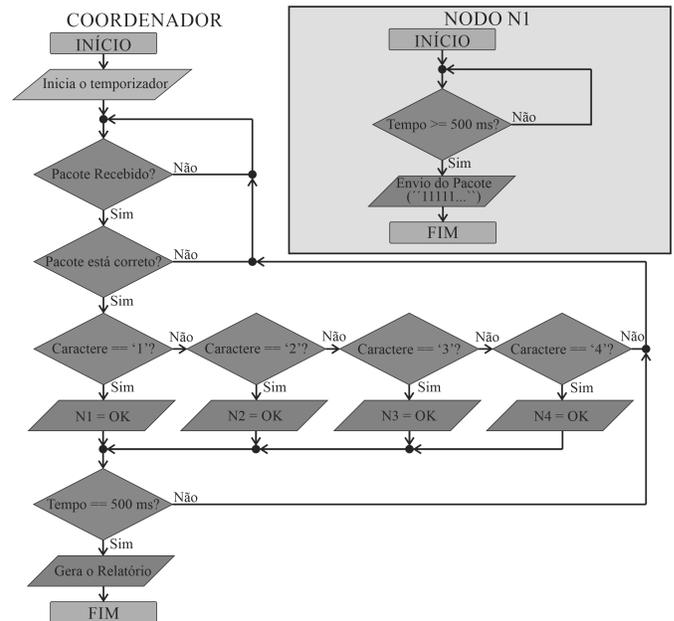


Fig. 5. Fluxograma resumido de programação.

para 86,65%, o WiFi obteve uma melhora em relação ao 40 B atingindo 87,27% de eficiência e o ZigBee reduziu ainda mais a taxa de sucesso alcançando o menor valor de 80,08%.

B. Simulação

A simulação foi implementada no programa OmNET++ com o framework INET. Inicialmente, foram realizados testes com os exemplos de redes sem fio da própria biblioteca.

O ambiente físico foi inserido utilizando a aplicação denominada Physical Environment do INET. A criação dos obstáculos foi realizada por coordenadas criadas num arquivo XML.

O ambiente de simulação foi criado de acordo com a planta baixa da residência (Fig. 3), onde na primeira etapa, os quatro nodos e o coordenador foram posicionados nas mesmas

TABLE I
COMPARATIVO DAS TAXAS DE SUCESSO DO SUB-GHZ.

Nodo SubGHz	20B		40B		60B	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
N1	93,48%	92,49%	86,51%	86,90%	88,93%	89,03%
N2	87,62%	88,03%	90,17%	90,99%	83,16%	84,44%
N3	88,68%	87,89%	89,49%	88,75%	84,76%	84,79%
N4	83,67%	83,72%	90,17%	89,37%	89,76%	88,93%

TABLE II
COMPARATIVO DAS TAXAS DE SUCESSO DO WiFi.

Nodo WiFi	20B		40B		60B	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
N1	97,33%	97,35%	79,90%	79,21%	84,81%	84,19%
N2	97,32%	97,31%	79,65%	79,08%	82,42%	82,42%
N3	81,53%	81,31%	88,38%	88,46%	85,92%	85,83%
N4	99,45%	99,43%	80,58%	80,40%	95,92%	95,85%

posições do experimento prático (representados pelos círculos verdes e o quadrado na Fig. 3). Em seguida, iniciou-se os testes para calibração da simulação, com o intuito de inserir variáveis de interferência interna e externa ao ambiente. O objetivo é obter valores próximos aos resultados do experimento (validar o modelo de simulação), para então aumentar a quantidade de nodos.

As variáveis alteradas foram Sigma e PacketRateError, ambas influenciam nas interferências do ambiente. Porém, somente utilizando esses parâmetros não foi possível obter a aproximação, logo optou-se por alterar individualmente a potência de transmissão dos nodos.

A simulação da tecnologia ZigBee foi realizada usando as definições do padrão IEEE 802.15.4, enquanto que no WiFi são utilizados clientes no padrão IEEE 802.11 e no Sub-GHz um modelo de rádio genérico, com o MAC desativado operando no modo *ad hoc*.

Os resultados obtidos na calibração estão representados nas Tabelas I, II e III. Os resultados possuem divergência máxima de 1,48% de erro em valores absolutos, ocorrida no nodo N1 da simulação com pacotes de 60 B do ZigBee.

Logo, os ambientes estão preparados para a segunda etapa de teste, com a inserção dos 47 nodos no cenário de simulação, ou seja, além dos quatro nodos e o coordenador do cenário anterior, que permanecem nas mesmas posições, foram adicionados 43 novos nodos (N5, N6,..., N47). A potência de transmissão dos nodos virtuais foi inserida através de um mapeamento baseado nos resultados reais. A Fig. 6 ilustra o cenário de simulação completo, com o posicionamento de todos os nodos.

A taxa de sucesso da rede Sub-GHz apresentou uma redução significativa. Essa diminuição do desempenho ocorreu devido a ausência de um controle de acesso ao meio do rádio e sua baixa taxa de transmissão. O nodo N5 apresentou a maior taxa de sucesso em todos os testes, este encontra-se a uma distância maior em relação a vários outros pontos da casa. O nodo N16 apresentou o pior resultado no teste com 20 B, sendo que esse ponto é o mais próximo ao coordenador e sem barreiras. A Tabela IV contém os resultados.

Os resultados da simulação com a rede WiFi podem ser

TABLE III
COMPARATIVO DAS TAXAS DE SUCESSO DO ZIGBEE.

Nodo ZigBee	20B		40B		60B	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
N1	99,86%	99,85%	92,30%	92,98%	81,54%	83,02%
N2	99,92%	99,83%	93,94%	93,47%	80,55%	81,94%
N3	99,89%	99,56%	88,05%	88,00%	80,99%	80,67%
N4	99,81%	99,83%	92,27%	93,37%	77,25%	78,34%

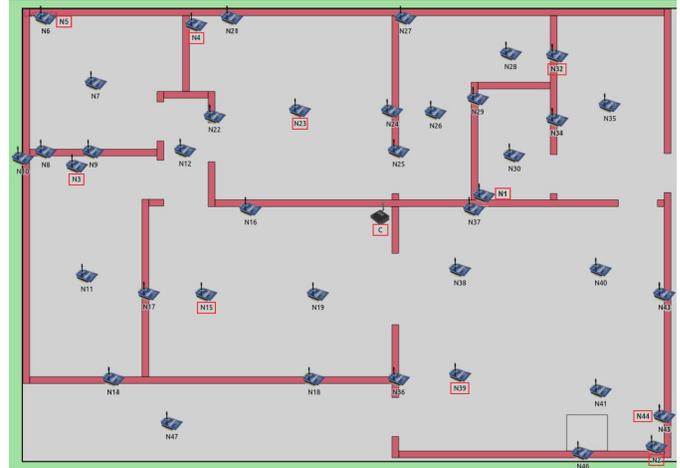


Fig. 6. Cenário completo com 47 nodos.

observados na Tabela V. Esta tecnologia obteve as maiores taxas de sucesso, com valores médios próximos a 90%. Os nodos N1, N2, N3 e N4 apresentam leve redução de desempenho, porém o valor médio teve melhora em comparação aos testes com apenas os 4 nodos. Com isso, pode-se concluir que o WiFi consegue suprir a necessidade de envio a cada 500 ms dos pacotes devido a alta taxa de transmissão. As perdas de pacotes são decorrentes da distância, barreiras físicas e interferência. Os melhores resultados são de nodos próximos ao coordenador, sendo que a taxa de sucesso vai reduzindo baseado nos problemas citados.

A rede ZigBee foi a única que apresentou uma relação entre taxa de sucesso e tamanho do pacote, onde a transmissão de mensagens de 60 B teve o pior resultado. A tecnologia obteve significativa redução no cenário com 47 nodos, diminuindo a taxa de sucesso para valores médios próximo a 30%. Os resultados apresentados na Tabela VI comprovam que uma taxa de transmissão menor, na escala de kbps, não é suficiente para lidar com a quantidade de pontos de comunicação apresentados.

Logo, os resultados obtidos condizem com a teoria sobre redes sem fio, observando que todos nodos tiveram redução de desempenho com a inserção de mais pontos de comunicação. Conclui-se também que o tamanho do pacote até 60 B, não afetam os valores de perda de pacotes nas tecnologias Sub-GHz e WiFi, pois não houve relação direta entre o valor do pacote e a porcentagem de pacotes recebidos. No ZigBee o crescimento não foi linear nessa relação, porém acompanha o aumento do tamanho do pacote.

TABLE IV
TAXA DE SUCESSO DOS NODOS N1 A N4 NA SIMULAÇÃO COMPLETA
SUB-GHZ.

Nodo Sub-GHz	20B (%)		40B (%)		60B (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
N1	93,48	37,08	86,51	37,08	88,93	35,42
N2	87,62	47,36	90,17	47,36	83,16	30,83
N3	88,68	37,22	89,49	37,22	84,76	44,44
N4	83,67	42,22	90,17	42,22	89,76	27,50
Média	88,36	44,09	89,08	45,19	86,65	36,38
Maior	N5		N5		N5	
Menor	N16		N44		N44	

TABLE V
TAXA DE SUCESSO DOS NODOS N1 A N4 NA SIMULAÇÃO COMPLETA
WiFi.

Nodo ZigBee	20B (%)		40B (%)		60B (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
N1	97,35	96,53	79,21	78,19	84,19	84,72
N2	97,31	96,81	79,08	75,83	82,42	80,83
N3	81,31	77,92	88,46	85,97	85,83	84,03
N4	99,43	99,03	80,40	74,03	95,85	94,03
Valor Médio	93,91	95,29	32,13	86,63	87,27	89,03
Maior	N16		N15		N15	
Menor	N3		N32		N3	

TABLE VI
TAXA DE SUCESSO DOS NODOS N1 A N4 NA SIMULAÇÃO COMPLETA
ZIGBEE.

Nodo ZigBee	20B (%)		40B (%)		60B (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
N1	99,85	56,25	92,98	22,92	83,02	20,83
N2	99,83	60,14	93,47	38,33	81,94	31,53
N3	99,56	67,08	88,00	28,06	80,67	24,86
N4	99,83	70,83	93,37	34,17	78,34	29,03
Valor Médio	99,87	63,00	91,64	33,96	80,08	30,78
Melhor Caso	N39		N23		N23	
Pior Caso	N44		N44		N44	

A taxa de sucesso reduziu apenas no teste com o WiFi, demonstrando que a taxa de transmissão é um fator relevante para uma rede composta por muitos nodos. Nos testes com ZigBee e Sub-GHz houve um aumento do valor médio, pois com taxas de transmissão menores não é possível atender a periodicidade de 500 ms.

Analisando os melhores e piores nodos, em referência a porcentagem de pacotes recebidos, é possível concluir:

- 1) No WiFi existem mais de um nodo que obtiveram 100% de pacotes enviados. O principal fator que reduz o desempenho da tecnologia é a interferência e a distância entre o Coordenador e os nodos, pois os pontos com maiores taxas estão mais próximo ao coordenador e o piores casos mais distantes.
- 2) Sub-GHz teve seu desempenho prejudicado por falta de um controle MAC. A distância e as barreiras não impactam o desempenho da tecnologia, dentro da realidade de residências, pois a melhor taxa foi do nodo N1 que está mais distante em relação a outros nodos na casa.
- 3) O ZigBee foi afetado pelo aumento do número de nodos, mesmo tendo um controle de acesso ao meio. Os nodos com maior taxa de pacotes enviados estão próximos ao

TABLE VII
CONSUMO DE CORRENTE ELÉTRICA NOS DIFERENTES MODOS DE
OPERAÇÃO.

Tecnologia	Dormindo [μ A]	Recebendo [mA]	Transmitindo [mA]
Sub-GHz	80	16	100
WiFi	10	50	170
ZigBee	1,10	40	40

coordenador e o pior caso foi o nodo N44, este está distante e com uma barreira significativa próxima.

Em vista dos argumentos apresentados e dados obtidos, conclui-se que o WiFi é a melhor solução do ponto de vista técnico. Sua média de taxa de sucesso foi de 90,32%, em comparação com o Sub-GHz de 41,89% e o ZigBee de 42,68%. A alta taxa de transmissão permite que o WiFi atenda uma grande quantidade de requisições com pacotes de tamanho expressivos e ainda possibilita a utilização de diferentes topologias de rede (modo *ad hoc*, por exemplo).

C. Análise Econômica

Um ponto muito importante para a popularização da SH é o custo acrescido nos produtos, por isso que a tecnologia precisa ter um amplo espaço consolidado no mercado e pouco impacto no preço final.

A análise econômica é uma tarefa muito complexa e tão impactante quanto o estudo técnico na modalidade de gerenciamento de energia, pois a ideia é que se tenha o controle sobre qualquer ponto de energia da residência. Logo, nessa ampla variação, encontram-se produtos de dezenas até milhares de reais, e esse custo pode representar um elevado impacto no preço final, justificando essa avaliação perante as soluções disponíveis no mercado. Nesse âmbito, as tecnologias menos usuais e mais recentes de comunicação baseadas em protocolos proprietários possuem desvantagens. A análise econômica realizada neste artigo está baseada somente em dois aspectos: custo direto e o custo do consumo energético.

O custo direto de cada solução foi obtido a partir de uma pesquisa com fornecedores, onde o valor orçado (em dólar) não inclui o frete. A quantidade utilizada na cotação foi de dez mil unidades de módulos, com o intuito de reduzir o preço na negociação e simular uma transação de nível industrial. O custo da unidade do módulo Sub-GHz ficou em US\$ 0,56, a unidade do módulo WiFi em US\$ 1,00 e em US\$ 3,00 para a unidade do módulo ZigBee.

Na relação custo direto e benefício, o WiFi apresenta maiores ganhos, mesmo com um valor pouco maior que o Sub-GHz, pois a solução vem com um microcontrolador integrado com GPIO digitais e analógicas. A existência de uma pilha de protocolos (TCP/IP) já implementada no módulo é um outro benefício, facilitando o desenvolvimento de produtos.

As tecnologias que operam no espectro do Sub-GHz estão em processo de normatização, porém, há também o seu uso recente em conjunto com outras soluções. A criação do padrão IEEE 802.11ah [16] é um exemplo. Esse padrão utiliza o WiFi e o Sub-GHz ao mesmo tempo, aumentando a gama de aplicações e oportunizando a utilização deste modelo em produtos alimentados por bateria. Esses fatores tornam os

rádios Sub-GHz competitivos na questão de custo direto. O modelo selecionado para o experimento é um módulo de comunicação puro, sem a possibilidade de operações com GPIO e nenhum protocolo previamente implementado.

Por fim, na análise de custo direto, o módulo ZigBee apresentou maior valor de mercado e solução semelhante ao rádio WiFi. Os modelos encontrados possuem microcontroladores embarcados com possibilidade de controle e sensoriamento simples através de GPIO. Os rádios já vêm com o padrão IEEE 802.15.4 implementado.

O segundo aspecto analisado é o custo do consumo de energia de cada tecnologia. Esse custo é baseado em diversos fatores, que são de difícil previsibilidade e não além do escopo deste trabalho, tais como: tipo de alimentação, variação do preço de energia, grupos tarifários, entre outros.

Na análise apresentada neste artigo, apenas o consumo direto de energia de cada tecnologia é considerado. O consumo de energia de cada componente varia de acordo com o modo de operação, normalmente dividido nos modos: dormindo, recebendo e transmitindo. A Tabela VII apresenta os consumos de corrente elétrica de cada tecnologia nos diferentes modos.

Todos os módulos utilizados possuem modo dormindo, nesse tipo de operação o microcontrolador tem seu funcionamento suspenso. No modo de recepção o componente permanece num estado mais passivo, aguardando a chegada de informações e utilizando o microcontrolador para interpretar a mensagem. A transmissão é a operação que consome mais energia.

Na comparação das tecnologias, o WiFi possui o maior consumo, como constatado na revisão da literatura. Esse problema é relatado em diversos trabalhos devido a associação entre SH e IoT, onde é composta por numerosas aplicações com alimentação a bateria. Analisando-se o contexto de SH é perceptível que as soluções para gerenciamento de energia sempre estarão conectadas a rede elétrica, pois, o principal objetivo é o controle da demanda das cargas ligadas.

Logo, a análise econômica centraliza no consumo de energia elétrica proveniente da rede da concessionária. O perfil de uso interfere na energia solicitada pelo módulo. Neste trabalho, realizou-se a comparação de correlação entre o custo direto e o consumo de energia nos três modos de operação. O caso onde o ponto de equilíbrio entre as tecnologias é alcançado em menor tempo é quando elas operam continuamente no modo de transmissão. Baseado na tarifa atual da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) de R\$ 0,557 por kWh e cotação do dólar de R\$ 4,32, montou-se o gráfico apresentado na Fig. 7.

Existem dois pontos de equilíbrio, para a comparação entre o WiFi e o ZigBee, a segunda tecnologia se torna viável após 5,57 anos de uso (48793 horas). Enquanto relacionando o Sub-GHz e o ZigBee, a viabilidade do segundo modelo é alcançado com 7,55 anos (66138 horas). Esses valores estão baseados em custos atuais e podem sofrer variação de acordo com a tarifa de energia elétrica, preço dos módulos, manutenção dos equipamentos, dentre outros fatores.

Porém, esse cenário de operação apenas em modo de transmissão durante todo o período de funcionamento não deve ocorrer, pois, normalmente os nodos enviam dados com base



Fig. 7. Comparativo entre os custos de operação das tecnologias (modo transmitindo).

numa periodicidade previamente definida. Quando compara o modos dormindo e recebendo, o tempo para o ponto de equilíbrio aumenta para valores superiores a 70 anos.

Conclui-se então que economicamente o ZigBee, mesmo tendo as menores correntes de consumo, é a solução menos viável, devido ao alto preço da tecnologia. As tecnologias Sub-GHz e WiFi possuem vantagens e desvantagens numa faixa de custo aproximada. Porém, o módulo WiFi possui microcontrolador, protocolo implementado e maior taxa de transmissão.

V. CONCLUSÃO

O conceito de SH traz diversos benefícios para o consumidor e o sistema elétrico como um todo, acompanhado de barreiras e desafios para sua implementação. As principais soluções para a comunicação entre os dispositivos dentro de uma SH são as tecnologias de redes sem fio.

O gerenciamento de demanda e energia é uma atividade que necessita enviar pacotes de tamanho pequeno e com periodicidade na casa das centenas de milissegundos. Assim, a rede sem fio deve atender esses requisitos para dezenas, ou centenas, de nodos em operação centralizada. Existe também a barreira econômica, pois se um módulo de comunicação aumentar o custo do produto consideravelmente, a expansão para todos os dispositivos será prejudicada.

Esse trabalho buscou as respostas sobre a tecnologia de rede sem fio que melhor atenderá o gerenciamento e demanda de uma SH técnica e economicamente.

Do ponto de vista técnico, os resultados apontam o IEEE 802.11 como única solução que atendeu satisfatoriamente os requisitos de taxa de sucesso de envio/recepção de pacotes. Com a tecnologia WiFi, os valores superam a faixa de 60%, tida como mínimo para um bom funcionamento de uma comunicação. As redes utilizando Sub-GHz e ZigBee, tiveram queda significativa no desempenho, com a extrapolação dos nodos, realizada na simulação computacional.

A análise econômica relacionou o custo direto dos módulos utilizados no experimento e seu consumo de energia. Nesse comparativo, o ZigBee apresenta vantagens após sete anos de operação em modo de transmissão, enquanto nos outros modos esse equilíbrio é alcançado apenas depois de 70 anos.

Logo, o módulo WiFi é considerada a melhor solução, pois seu custo inicial representa apenas 27,03% do preço do módulo ZigBee e ainda permite a comunicação direta com diversos produtos já comercializados.

Em vista dos resultados apresentados, a tecnologia baseada no padrão IEEE 802.11 apresentou melhor desempenho técnico e custo/benefício para o gerenciamento e demanda de energia dentro de ambientes de SHs.

REFERENCES

- [1] M. O. PINTO, “Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados,” *Rio de Janeiro: LTC*, 2014.
- [2] A. A. Cecília and K. Sudarsanan, “A survey on smart grid,” in *2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)*, 2016, pp. 1–7.
- [3] A. Saad al sumaiti, M. H. Ahmed, and M. M. Salama, “Smart home activities: A literature review,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 3–4, pp. 294–305, 2014.
- [4] T. Dragičević, P. Siano, S. Prabaharan *et al.*, “Future generation 5G wireless networks for smart grid: a comprehensive review,” *Energies*, vol. 12, no. 11, p. 2140, 2019.
- [5] S. Singh, A. Roy, and M. Selvan, “Smart load node for nonsmart load under smart grid paradigm: A new home energy management system,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 22–27, 2019.
- [6] K. G. Di Santo, E. Kanashiro, S. G. Di Santo, and M. A. Saidel, “A review on smart grids and experiences in brazil,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1072–1082, 2015.
- [7] T. Mendes, R. Godina, E. Rodrigues, J. Matias, and J. Catalão, “Smart and energy-efficient home implementation: Wireless communication technologies role,” in *5th IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2015, pp. 377–382.
- [8] T. Schneider. (2015, mar) IoT: Is tech the easy part?., [Online]. Available: <https://gcn.com/articles/2015/05/19/iot-policy-lags-technology.aspx>
- [9] A. Mahmood, N. Javaid, and S. Razaq, “A review of wireless communications for smart grid,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 41, pp. 248–260, 2015.
- [10] A. Kailas, V. Cecchi, and A. Mukherjee, “A survey of communications and networking technologies for energy management in buildings and home automation,” *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2012, 2012.
- [11] Y. Kabalci, “A survey on smart metering and smart grid communication,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 302–318, 2016.
- [12] Y.-C. Li and S. H. Hong, “BACnet–EnOcean smart grid gateway and its application to demand response in buildings,” *Energy and buildings*, vol. 78, pp. 183–191, 2014.
- [13] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Review of communication technologies for smart homes/building applications,” in *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, 2015, pp. 1–6.
- [14] M. Emmanuel and R. Rayudu, “Communication technologies for smart grid applications: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 74, pp. 133–148, 2016.
- [15] L. Davoli, L. Belli, A. Cilfone, and G. Ferrari, “From micro to macro IoT: Challenges and solutions in the integration of IEEE 802.15.4/802.11 and sub-GHz technologies,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 784–793, 2017.
- [16] “IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks–specific requirements - part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications amendment 2: Sub 1 ghz license exempt operation,” *IEEE Std 802.11ah-2016 (Amendment to IEEE Std 802.11-2016, as amended by IEEE Std 802.11ai-2016)*, pp. 1–594, 2017.
- [17] T. Nguyen, B. Lakshmanan, C. Lin, W. Sheng, Y. Gu, M. Liu, and S. Zhang, “A miniature smart home testbed for research and education,” in *7th IEEE Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, 2017, pp. 1637–1642.
- [18] M. Burunkaya and T. Pars, “A smart meter design and implementation using ZigBee based wireless sensor network in smart grid,” in *4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, 2017, pp. 158–162.
- [19] A. Ghosh and N. Chakraborty, “Design of smart grid in an university campus using ZigBee mesh networks,” in *IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPE-ICES)*, 2016, pp. 1–6.
- [20] S.-L. Chen, S.-K. Chang, and Y.-Y. Chen, “Development of a multisensor embedded intelligent home environment monitoring system based on digital signal processor and Wi-Fi,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 6, p. 171365, 2015.
- [21] I. M. Ozcelik, I. Korpeoglu, and A. Agrawala, “Energy efficient IP-connectivity with IEEE 802.11 for home M2M networks,” 2017.
- [22] S. Yildiz and M. Burunkaya, “Web based smart meter for general purpose smart home systems with ESP8266,” in *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2019, pp. 1–6.
- [23] A. R. D. DGND, “Single-phase multifunction metering IC with di/dt sensor interface ADE7753.”
- [24] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, “A protocol suite for wireless sensor and actor networks,” in *Proceedings. 2004 IEEE Radio and Wireless Conference (IEEE Cat. No. 04TH8746)*, 2004, pp. 11–14.
- [25] C. PETRUCCI. Mercado imobiliário. [Online]. Available: <http://www.secovi.com.br/downloads/pesquisas-e-indices/balancos-do-mercado/2017/arquivos/anuario-do-mercado-imobiliario-2017-celso-petrucci.pdf>
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão*, 2018.
- [27] Elecrow, *HC-12 Wireless Serial Port Communication Module User Manual*, 2012.
- [28] Shenzhen Anxinke Technology. (2015) ESP-07 WiFi module. [Online]. Available: <http://www.ai-thinker.com>
- [29] D. International, “XBee ® / XBee-PRO ® ZB RF modules Digi international inc,” Digi Int. Inc, apr 2012.



Marcelo M. Amoroso graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade SATC, em 2014, e pós-graduado em Engenharia de Produção. Recebeu recentemente o título de Mestre em Energia e Sustentabilidade pela UFSC (2020). Suas áreas de pesquisa são IoT, Eletrônica Industrial e Sistemas Embarcados.



Ricardo Moraes recebeu o título de doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Universidade do Porto, Portugal, em 2007. É professor associado e pesquisador no Departamento de Computação da UFSC. Seus interesses de pesquisa incluem sistemas distribuídos, sistemas de comunicação em tempo real, redes sem fio e redes elétricas inteligentes.



Gustavo M. de Araújo graduado em Informática pela Universidade Católica de Brasília, Brasil, é mestre em Ciência da Computação pela UFSC, Brasil. Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas pela UFSC, e fez o curso de Doutorado sanduíche na Universidade de Magdeburg, Alemanha. Professor adjunto na UFSC no Departamento de Ciência da Informação e trabalha com Ciência de Dados.



Vagner S. Rodrigues graduado em 2014 em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Recebeu recentemente o título de Mestre em Energia e Sustentabilidade pela UFSC (2020). É Professor na Escola Educacional Técnica SATC (desde 2014). Seus interesses de pesquisa incluem internet das coisas e sistemas embarcados.