



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

MANOEL VITORIO BARBIN

**ETIQUETA PASSIVA DE RFID COM SENSOR DE
CORRENTE ELÉTRICA**

**CAMPINAS
2022**

MANOEL VITORIO BARBIN

**ETIQUETA PASSIVA DE RFID COM SENSOR DE
CORRENTE ELÉTRICA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO MANOEL VITORIO BARBIN
E ORIENTADO PELO PROF. DR. MICHEL DAOUD YACOUB

Assinatura do Orientador

**CAMPINAS
2022**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

B234e Barbin, Manoel Vitorio, 1957-
Etiqueta passiva de RFID com sensor de corrente elétrica / Manoel Vitorio Barbin. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Michel Daoud Yacoub.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sensor. 2. RFID. 3. Energia elétrica. 4. Internet das coisas. I. Yacoub, Michel Daoud, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Passive RFID tag with electric current sensor

Palavras-chave em inglês:

Sensor

RFID

Electrical energy

Internet of things

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Michel Daoud Yacoub [Orientador]

Paulo Cardieri

Diana Cristina Gonzáles González

Ailton Akira Shinoda

José Antonio Martins

Data de defesa: 28-04-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: orcid.org/0000-0001-8338-5054

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4782483698416219>

COMISSÃO JULGADORA – TESE DE DOUTORADO

Candidato: Manoel Vitorio Barbin RA: 760596

Data da Defesa: 28 de abril de 2022

Título da Tese: “Etiqueta Passiva de RFID com Sensor de Corrente Elétrica”.

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Prof. Dr. Paulo Cardieri

Profa. Dra. Diana Cristina González González

Prof. Dr. Ailton Akira Shinoda

Prof. Dr. José Antonio Martins

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

Para Michael Faraday, meu cientista inspirador.

AGRADECIMENTOS

Antes de qualquer outro agradecimento que eu possa fazer, e seriam muitos para poucas linhas, agradeço ao meu maior mestre, Jesus, que me deixou um manual de como exercitar dia a dia a bondade, o respeito, a tolerância e tantas outras importantes lições que cuido com carinho e procuro seguir nessa jornada que é a vida.

Agradeço também a Ele por me dar as ferramentas para conhecer (e se não muito, é pelas minhas próprias falhas) alguns fundamentos que sustentam essa linda ciência, ou arte, que é a Engenharia Elétrica e pela qual devoto amor.

Tive mestres que me ensinaram muitas coisas e a quem dedico enorme gratidão por chegar até aqui. Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub que, com sua grande persistência e crédito neste aluno, me fez concluir esse trabalho. Ao amigo Prof. Dr. Elvio João Leonardo que, com dedicação e carinho, me ajudou no cumprimento de um importante requisito para o término deste trabalho. Ao meu amado irmão Prof. Silvio Ernesto Barbin que sempre exigiu o melhor de mim e hoje, após uma vida dedicada à prática e ao ensino da Engenharia, descansa nos braços de Deus, com nossos pais.

Agradeço tantos e tantos colegas que, ainda que desconheçam, colocaram sólidas porções de massa nos tijolos da minha confortável casa (minha profissão), conhecimentos que me sustentam. A todos sou grato pelas inúmeras conversas técnicas que tanto apreciei ao longo da minha carreira.

Não menos, mas sim, com imensa gratidão, agradeço à minha família, meus amores, esposa, filhas, filhos, genros, neta, irmã, amigos e amigas por existirem e sempre estarem comigo, nos meus pensamentos, no meu coração.

Não poderia deixar de agradecer, de forma muito especial, ao suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro dado ao projeto PowerID – PIPE nº 15/50477-3, do qual este trabalho é uma significativa derivação. Nesse projeto, tive a satisfação de trabalhar com a Pullup Soluções em Sistemas Eletrônicos Ltda., empresa de dois grandes amigos, Giuliano Leite De Vitor e Conrado Leite De Vitor, que nominalmente cito, em agradecimento e consideração por me apoiarem na decisão de seguir adiante com este trabalho.

RESUMO

Em termos gerais, RFID (*Radio Frequency Identification*) é uma tecnologia utilizada na identificação de objetos ou pessoas pela transferência de dados por radiofrequência (RF). O reconhecimento é baseado em sistemas de radar, que usa técnicas de identificação de objetos por meio de espalhamento ou reflexão difusa de ondas de rádio [1].

Basicamente, os sistemas RFID são constituídos de leitores e etiquetas colocadas em objetos. Um leitor usa comandos que modulam ondas de rádio para consultar as etiquetas. Estas, por sua vez, respondem com informações relevantes do objeto associado. Elementos transmissores/receptores de campos magnéticos ou eletromagnéticos (antenas) são usados na interação entre o leitor e a(s) etiqueta(s). Normalmente, leitores RFID são conectados a computadores que armazenam, processam e compartilham as informações recuperadas.

Em um sistema RFID, as etiquetas podem ser classificadas em ativas, semiativas e passivas [1]. As ativas ou semiativas possuem uma fonte de energia (bateria) para operar enquanto que as passivas, compostas basicamente de um circuito integrado e uma antena, convertem a energia eletromagnética recebida em tensão contínua para alimentar a parte eletrônica da etiqueta. Do ponto de vista de custo, etiquetas passivas são muito atrativas e representam a alternativa preferencial na implementação de sistemas comerciais de RFID.

Nos últimos anos, as etiquetas de RFID têm incorporado outras funções que vão além da identificação de objetos. A principal delas é a monitoração de parâmetros diversos como, por exemplo, a temperatura, a umidade relativa ou o nível de iluminação, e têm sido denominadas de etiquetas-sensores (*Sensor-Tags*) [2].

A integração de sensores em etiquetas coloca RFID entre as tecnologias disponíveis para a utilização na Internet das Coisas (IoT), uma rede de comunicação física de objetos capazes de coletar e transmitir dados na internet para um nó central que armazena, processa e disponibiliza as informações coletadas.

A Etiqueta Passiva com Sensor de Corrente Elétrica (EPSCE), proposta neste trabalho, opera na faixa de UHF (*Ultra High Frequency*), de 902,75 MHz a 927,25 MHz, e possibilita a identificação da existência do consumo de energia elétrica por um equipamento eletroeletrônico, sem reduzir a distância de leitura dentro da área de cobertura de um leitor de RFID.

Entre as aplicações potenciais das EPSCEs está a monitoração individualizada do consumo de energia elétrica de um equipamento em ambientes domésticos e industriais, bem como a rastreabilidade, característica inerente de um sistema RFID.

No atual conhecimento do autor, a solução proposta neste trabalho é original e enquadra-se no cenário da IoT. Constitui uma opção para automação residencial ou corporativa, disponibilizando para o consumidor o controle dos gastos de energia de aparelhos elétricos e/ou eletroeletrônicos locais. Pode complementar ou integrar outros subsistemas RFID de automação, o que leva à redução de gastos com leitores e desenvolvimento de aplicativos de software.

Palavras-chave: Sensor; RFID; Energia Elétrica; Internet das Coisas

ABSTRACT

In general terms, RFID (Radio Frequency Identification) is a technology used to identify objects or persons by the transfer of data using contactless radio frequency (RF) techniques. The way of recognition is based on radar systems and relies on scattering or diffuse reflection of radio waves [1].

Basically, RFID systems are comprised of RFID readers and RFID tags placed on objects. A reader uses commands that modulate radio waves to enquire tags. Tags, by their turn, respond with the relevant information about the associated instance. Transmitter and receiver elements of magnetic or electromagnetic fields (antennas) are used in the reader-tag interaction. RFID readers are usually connected to computers on which information retrieved can be stored, processed, and shared.

In an RFID system, tags can be classified as active, semi active, and passive [1]. An active or semi-active tag has an energy source, such as a battery, to operate, while a passive tag does not. Passive tags, composed by an integrated circuit and an antenna, need to convert energy received into direct voltage to power its circuitry. From a cost point of view, passive tags are very appealing and, therefore, represent the preferred alternative in implementing commercial RFID systems.

In recent years, tag usage has increasingly grown beyond object identification. One exciting area is monitoring parameters such as temperature, relative humidity, and luminosity level, and these have been called RFID Sensor-Tags [2].

The integration of sensors into RFID tags places it among the technologies available for use in the Internet of Things (IoT), a network of physical objects capable of gathering and transmitting data over the internet to a central node for storage, processing and availability of collected information.

The Passive Tag with Electric Current Sensor (EPSCE) proposed in this work operates in the Ultra-High Frequency (UHF) band, from 902.75 MHz to 927.25 MHz and enables the detection of energy consumption by electrical or electronic equipment without reducing the reading capability (maximum distance) of an RFID reader.

Among the potential applications of EPSCEs is the individualized energy monitoring of electrical energy consumptions by equipment in domestic and industrial environments, as well as traceability, an inherent characteristic of an RFID system.

To the author's current knowledge, the solution proposed in this work is original, not available in the market, or reported in the open literature. It fits into the IoT scenario and constitutes an option for residential or corporate automation, by providing the control of energy costs of local electrical and electronic devices for consumers. It can complement or integrate other RFID automation subsystems, which leads to reduced spending on readers and software application development.

Key words: Sensor; RFID; Electrical Energy; Internet of Things.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Elementos básicos de um sistema RFID

Figura 2.2 – Ciclo de leitura de uma etiqueta de RFID em UHF

Figura 2.3 – Diagrama de blocos de uma etiqueta de RFID em UHF

Figura 2.4 – *Link budget* dos enlaces direto e reverso de um sistema RFID em UHF

Figura 2.5 – Circuito equivalente de uma antena receptora conectada a uma carga

Figura 2.6 – Etiqueta com sensor de energia (corrente) elétrica e componentes do sistema

Figura 2.7 – Diagrama de blocos da EPSCE

Figura 2.8 – Sensor de corrente. Colocação sobre o cabo – Opção 1

Figura 2.9 – Sensor de corrente – Opção 2

Figura 2.10 – Curva característica de um varactor

Figura 2.11 – Circuito de RF com CI de RFID (carga da antena)

Figura 2.12 – Circuitos equivalentes da antena e da carga

Figura 3.1 – Sensor de corrente TA12-100

Figura 3.2 – Circuito do sensor de corrente com retificador e o filtro

Figura 3.3 – Circuito para as simulações no PSpice

Figura 3.4 – Diagrama de blocos do *setup* de medição da tensão V_c

Figura 3.5 – Tensão V_c em função da potência da carga. Valores simulados e medidos

Figura 3.6 – Circuito de RF e RFID

Figura 3.7 – Modelo simplificado de um varactor e valores típicos do SMV1231-079LF

Figura 3.8 – Diagrama de blocos do *setup* de medição da capacitância do varactor

Figura 3.9 – Curva característica do varactor SMV1231-079LF

Figura 3.10 – CI Higgs™ 4 – encapsulamento SOT-323 e terminais de conexão

Figura 3.11 – Diagrama de blocos do *setup* para medição da sensibilidade e da impedância do CI

Figura 3.12 – Antena da EPSCE

Figura 3.13 – Parte real da impedância da antena

Figura 3.14 – Parte imaginária da impedância da antena

Figura 3.15 – Ganho da antena

Figura 3.16 – *Layout* da EPSCE

Figura 3.17 – Circuito utilizado na simulação

Figura 3.18 – Parte real da impedância Z_L para diferentes valores de C_J

Figura 3.19 – Parte imaginária da impedância Z_L para diferentes valores de C_J

Figura 3.20 – Coeficiente de transmissão de potência para diferentes valores de C_J

Figura 3.21 – Distância máxima em função da capacitância C_J para diferentes valores de P_T , com $G_T = 6$ dBi, $p = 1$ e $P_{thE} = -18,5$ dBm

Figura 3.22 – Variação da distância máxima (área de cobertura) com τ

Figura 3.23 – Sistema RFID com várias EPSCEs

Figura 3.24 – Sistema RFID para a detecção de várias EPSCEs

Figura 3.25 – Ciclo de detecção das EPSCEs

Figura 3.26 – Encapsulamento da EPSCE

Figura 3.27 – Sensor de corrente atravessado por um pino de fase da tensão alternada

Figura 3.28 – Detalhes da acomodação da PCI no encapsulamento da EPSCE

Figura 3.29 – Parte do encapsulamento da EPSCE com o sensor na PCI, acoplado ao pino de fase

Figura 3.30 – Protótipo da EPSCE

Figura 3.31 – Variação da tensão V_c com a potência da carga para diferentes valores de R_A

Figura 4.1 – Configuração de teste da EPSCE

Figura 4.2 – Telas inicial e de configuração do software ItemTest

Figura 4.3 – Teste da EPSCE com lâmpadas incandescentes

Figura 4.4 – ESPCEs para uso nos testes de campo

Figura 4.5 – Localização da antena do leitor e da EPSCE em um ambiente de teste

Figura 4.6 – Vista de cima da cozinha, copa e área de serviço

Figura 4.7 – Vista de cima da sala

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Sensores RFID: principais campos de aplicação e exemplos práticos

Quadro 1.2 – Sensores RFID comerciais

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Frequências de RFID e distâncias de leitura

Tabela 3.1 – Características do sensor de corrente TA12-100

Tabela 3.2 – Valores medidos do CI Higgs™ 4

Tabela 4.1 – Resultados do teste funcional da EPSCE

Tabela 4.2 – Eletrodomésticos e EPSCEs associadas

Tabela 4.3 – Localização da antena e das EPSCEs na cozinha, copa e área de serviço

Tabela 4.4 – Localização da antena e das EPSCEs na sala

Tabela 4.5 – Potência de saída do leitor para as EPSCEs não detectadas

Tabela 4.6 – Detecção das EPSCEs – Equipamentos ligados na cozinha, copa e área de serviço

Tabela 4.7 – Detecção das EPSCEs – Equipamentos ligados na sala

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Tridimensional

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CC – Corrente Contínua

CI – Circuito Integrado

CW – *Continuous Wave*

EPC – *Electronic Product Code*

EPSCE – Etiqueta Passiva com Sensor de Corrente

EPSCE_AP – EPSCE para cargas de alta potência

EPSCE_BP – EPSCE para cargas de baixa potência

ERP – *Enterprise Resource Planning*

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

HF – *High Frequency*

IoT - *Internet of Things*

ISM – *Industrial, Scientific, and Medical*

LF – *Low Frequency*

PCI – Placa de Circuito Impresso

PLC – *Power Line Communications*

RCS – *Radar Cross Section*

RF – Radiofrequência

RFID – *Radio Frequency Identification*

SHF – *Super High Frequency*

UHF – *Ultra High Frequency*

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO..... | 18 |
| 1.2. SENSORES RFID | 21 |
| 1.3. CONTRIBUIÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA..... | 23 |
| 1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 24 |
| CAPÍTULO 2 EPSCE – ASPECTOS TEÓRICOS..... | 25 |
| 2.1. ELEMENTOS BÁSICOS DE SISTEMAS RFID E ETIQUETAS COMO SENSORES..... | 25 |
| 2.2. ASPECTOS DE RF EM SISTEMAS RFID COM ETIQUETAS PASSIVAS..... | 29 |
| 2.3. FUNCIONAMENTO DA EPSCE..... | 36 |
| CAPÍTULO 3 PROJETO E OPERAÇÃO DA EPSCE..... | 41 |
| 3.1. PROJETO DA EPSCE..... | 41 |
| 3.1.1. Sensor de Corrente, Retificador e Filtro..... | 41 |
| 3.1.2. Circuito de RF e RFID | 44 |
| 3.1.3. Antena da EPSCE..... | 48 |
| 3.2. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA EPSCE..... | 51 |
| 3.3. SISTEMA RFID COM DIVERSAS EPSCEs..... | 56 |
| 3.4. PROJETO MECÂNICO DA EPSCE..... | 58 |
| 3.5. POTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS IDENTIFICADOS PELA EPSCE..... | 60 |
| CAPÍTULO 4 TESTES E RESULTADOS..... | 62 |
| 4.1. TESTES FUNCIONAIS DA EPSCE..... | 62 |
| 4.2. TESTES DE CAMPO..... | 64 |
| CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 70 |
| 5.1. CONCLUSÃO..... | 70 |
| 5.2. PRÓXIMOS PASSOS E TRABALHOS FUTUROS | 71 |
| REFERÊNCIAS..... | 72 |
| APÊNDICE..... | 79 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório está organizado da seguinte forma: na Seção 1.1, apresentam-se a motivação e o objetivo deste trabalho. Na Seção 1.2, faz-se um resumo das soluções de sensores RFID (*Radio Frequency Identification*) em estudo e os disponíveis no mercado. A principal contribuição deste trabalho e uma revisão da literatura são apresentadas na Seção 1.3. Na Seção 1.4, indica-se como o trabalho está organizado. Uma descrição resumida dos capítulos subsequentes é apresentada.

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

Nas últimas décadas, várias tecnologias têm se combinado para permitir o desenvolvimento de aplicações amparadas por princípios de maior eficiência, disponibilidade de dados e mais poder de decisão, monitoramento e controle para o usuário final.

Este projeto trata da busca de uma solução que, combinando tecnologias, princípios e tendências vigentes, pretende facilitar a detecção e o monitoramento do consumo de energia elétrica de equipamentos eletroeletrônicos residenciais e industriais, fornecendo informações relevantes para a tomada de decisões sobre o uso de energia, um bem cada vez mais escasso e caro. Dessa forma, dialoga com a tendência recente de adoção de medidores inteligentes de energia elétrica em substituição às versões tradicionais; com o advento da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), que permite que objetos troquem informações na rede; e com a expansão do conceito de uso de RFID, uma tecnologia já adotada para a identificação de objetos que passa a assumir, também, funções de sensoriamento.

Atualmente, ainda predominam as redes tradicionais de serviços de fornecimento de energia elétrica com o uso de medidores eletromecânicos convencionais, utilizados para detectar e exibir o consumo de energia em um dado estabelecimento na forma de leituras. Eles apuram o consumo mensal de energia das residências e dos estabelecimentos industriais, comerciais e públicos. O sistema adotado de faturamento pelas concessionárias de energia elétrica reconhece apenas o consumo geral dessas instalações.

Em versões mais modernas, os medidores passam a incorporar algum tipo de digitalização [3]-[6]. Mas, mesmo assim, ainda possuem várias limitações, motivo pelo qual muitos países, especialmente no continente europeu, têm investido na implantação em massa de medidores inteligentes [7].

A despeito da inteligência incorporada aos novos medidores, os consumidores ainda têm pouco ou nenhum acesso aos seus dados diários de consumo de energia elétrica e não conseguem determinar o gasto individualizado de seus equipamentos, o que poderia levar, por exemplo, à tomada de decisões sobre a melhor utilização dos mesmos.

Ao mesmo tempo, na última década, uma nova era de sistemas computacionais ganhou grande força no mercado, com investimentos crescentes e contínuos realizados por várias empresas em um novo *boom* da computação. Esta nova era, denominada IoT, caracteriza-se pela conexão de dispositivos variados à internet, gerando uma rede gigantesca de dados que podem ser transformados em informações importantes para facilitar a vida das pessoas [8]-[11].

Como decorrência dos avanços na computação ubíqua e da IoT, os consumidores passam a ter acesso a uma infinidade de soluções em vários campos de aplicação, como em cuidados com a saúde, automação residencial, sistemas de segurança, monitoramento ambiental, etc. Como a IoT é, em essência, uma rede integrada de sensoriamento e de comunicação de dispositivos, ela pode ser usada para monitorar vários parâmetros à distância, de modo eficiente e efetivo, sendo um dos mais cruciais, o consumo de energia elétrica [12].

A monitoração do consumo energético de equipamentos eletroeletrônicos em uma rede de energia elétrica habilitada para IoT pode permitir a obtenção de dados relativos ao consumo individual de cada aparelho. Esses dados podem ser usados para identificar, analisar e resolver problemas diversos relacionados ao gasto de energia elétrica em um ambiente residencial, industrial ou comercial. Dessa forma, os consumidores podem, por exemplo, determinar um padrão de gastos por equipamento, gerenciar conscientemente o consumo de energia, detectar e substituir aparelhos defeituosos e de uso intensivo por equivalentes mais eficientes do ponto de vista energético.

No contexto da IoT, os sensores desempenham um papel fundamental, em virtude da sua capacidade de traduzir condições ambientais (temperatura, umidade e pressão),

situações operacionais de objetos e equipamentos (ligado e desligado, fluxo alto ou baixo de líquidos, etc.) e sinais vitais do corpo humano (batimento cardíaco, pressão sanguínea, etc.) em dados que contribuem para a tomada de decisões humanas ou de máquinas.

Em uma dinâmica paralela ao advento e crescimento da IoT, a tecnologia de RFID tem se expandido para além do seu objetivo original de identificar objetos, assumindo também funções de sensoriamento. Essa expansão do conceito, conhecida como *RFID as a Sensor*, tem sido implementada em diversas aplicações, em várias áreas [13].

Os sistemas RFID utilizam etiquetas que, colocadas em objetos, são identificadas de forma única por leitores conectados a emissores/receptores de campos magnéticos ou eletromagnéticos (antenas). As etiquetas que, em princípio, são utilizadas para identificar objetos a serem monitorados passam a permitir o sensoriamento de parâmetros diversos [14]-[16].

A evolução da tecnologia RFID para incorporar funções de sensoriamento nas etiquetas permite não somente o rastreamento do objeto de interesse (o que é e onde se encontra) mas, adicionalmente, a obtenção de informações do seu *status*, dependendo da função desempenhada como sensor. Assim, etiquetas-sensores RFID passam a constituir uma importante área de aplicações da tecnologia passível de ser incluída, com sucesso, no contexto da IoT.

Várias outras características da tecnologia RFID tornam a sua escolha bastante adequada para aplicações na IoT. Entre elas, pode-se mencionar a possibilidade de leitura dos dados em longas distâncias, a segurança propiciada pelo uso de criptografia durante o processo de transmissão das informações, a capacidade de armazenamento e do tratamento dos dados extraídos dos objetos e a resiliência das etiquetas na identificação quando instaladas em ambientes críticos, como por exemplo, com a presença de líquidos ou em temperaturas elevadas [17].

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e testes realizados em uma das partes constituintes e fundamentais de um sistema de RFID: a etiqueta de identificação por radiofrequência que opera como um sensor de detecção de energia elétrica. Suas possíveis aplicações com êxito na automação residencial, comercial e industrial inserem a etiqueta totalmente dentro do contexto da IoT.

Colocada em um sistema RFID convencional, a EPSCE (Etiqueta Passiva com Sensor de Corrente Elétrica) proposta é capaz de informar a condição ou não de consumo de energia elétrica por equipamentos elétricos e eletrônicos.

Com isso, a EPSCE integrada em um sistema RFID típico torna possível avaliar a quantidade de energia gasta durante o período de monitoração, além de possibilitar a obtenção de informações dos equipamentos como, por exemplo, o número de série, o modelo, o fabricante e a tensão de operação.

No âmbito de um sistema de RFID, combinando EPSCEs a uma estrutura de menor ou maior porte suportada por hardware, software e bases alternativas de dados, vários casos de uso podem ser implementados. Por exemplo, na apuração dos gastos de energia com o uso de equipamentos críticos; na determinação do momento mais propício, em termos de custos de energia, para o funcionamento de um dado equipamento; no suporte à decisão sobre a substituição de um equipamento por outro, visando à redução dos gastos; na estimativa do consumo energético diário, mensal ou anual de um dado equipamento (ou conjunto de equipamentos) e em outras simulações de consumo.

1.2. SENSORES RFID

Sensores RFID são uma solução bastante atrativa em numerosos cenários de uso tais como, em manufatura, em logística, na agricultura, em cuidados com a saúde e na monitoração da qualidade de alimentos. Eles constituem um novo paradigma para IoT, em virtude do baixo custo e pouca necessidade de manutenção.

Numerosos esforços têm sido realizados na pesquisa de soluções de sensores RFID devido ao grande potencial de inovação em diversos campos de aplicação. Uma grande quantidade de patentes tem sido registrada nas últimas duas décadas. A quantidade de patentes supera o número de artigos científicos publicados em revistas especializadas e conferências [18]. Entre os diversos campos de aplicação de sensores RFID, os mais significativos são destacados no Quadro 1.1, onde vários ainda se encontram em estágio de pesquisa e desenvolvimento. Destaca-se o fato de não existirem exemplos significativos no campo de aplicação deste trabalho: monitoração do consumo de energia elétrica.

Quadro 1.1 – Sensores RFID: principais campos de aplicação e exemplos práticos.

| Sensores RFID para Monitoração | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------------------------|--|
| Cuidados com a Saúde | Qualidade de Alimentos | Agricultura | Automotiva | Monitoração de Estruturas | Espaciais | Vestíveis e Implantáveis | Localização e Monitoração de Atividade |
| Temperatura do corpo | Frescor de carne, peixes e vegetais | Composição do solo | Produção automática | Fraturas em metal e concreto | Temperatura | Movimentos humanos | Localização de objetos e pessoas |
| Glicose no sangue | Data de validade | Irrigação precisa | Segurança no transporte de crianças | Detecção de avarias em estruturas | Gás carbônico | Frequência cardíaca e respiratória | Atividade humana |
| | | Cadeia de suprimentos de alimentos | Pressão dos pneus | Movimentos nas estruturas | Carga de baterias | | Atividade de robôs |
| | | Plantação de uvas | Distância entre veículos | Corrosão | | | |
| | | Cadeia de resfriados | | | | | |

Fonte: Elaboração própria a partir [18]

No Quadro 1.2, a título de exemplo, relacionam-se sensores RFID disponíveis no mercado. Vários deles necessitam de uma fonte de alimentação externa para operarem. Portanto, não são úteis para o uso nas denominadas etiquetas passivas de RFID que prescindem da utilização de baterias no seu funcionamento.

Quadro 1.2 – Sensores RFID comerciais.

| Principais fabricantes de Sensores RFID | |
|---|--|
| Fabricante | Sensor |
| AMS Axzon (RFMicro) | Temperatura/Integração com sensores externos Temperatura, névoa |
| Farsens | Temperatura, umidade, força/tensão, pressão Detecção de RF/LED, monitoração de chaves, orientação, luz, campo magnético |
| Infratab | Frescor de alimentos |
| Melexis | Temperatura/integração com sensores externos |
| NXP | Temperatura |
| ON Semiconductor | Temperatura, névoa |
| Phase IV | Temperatura, composição química, pressão, tensão mecânica |
| PowerCast | Temperatura, umidade, luz |
| RadioForce | Temperatura, umidade, detecção de água, movimento, vibração, pressão |
| Silent Sensors | Condição de pneus |
| Smartrac | Temperatura, névoa |
| Texas Instruments | Temperatura, sensor externo |
| PST Sensors | Temperatura |

Fonte: Elaboração própria a partir [18]

Em comparação com o Quadro 1.1, observa-se a existência de diversas lacunas de sensoriamento a serem preenchidas, fato que serve de motivação na busca de soluções de produtos para aplicações ainda não contempladas pela tecnologia.

1.3. CONTRIBUIÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

Como destacado na seção anterior, para a monitoração do consumo de energia elétrica e do controle dos gastos pelos consumidores, poucas soluções com sensores baseados especificamente na tecnologia RFID têm sido encontradas, mesmo na literatura especializada. Em geral, soluções que usam RFID são vistas com maior frequência em bancos de patentes e não têm sido implementadas em produtos à disposição dos consumidores.

Com o objetivo de contribuir para a redução, ainda que pequena, da escassez de soluções de sensores RFID para a monitoração do consumo de energia elétrica por equipamentos elétricos/eletrônicos, a principal contribuição deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma etiqueta passiva de RFID para a monitoração do consumo de energia elétrica.

Os principais fatores de justificativa e de apelo da solução descrita são: a etiqueta é significativamente mais simples e barata que outras alternativas, ainda que utilizem diferentes técnicas, disponíveis no mercado ou apresentadas na literatura. É mais sensível que outras soluções mais complexas e é capaz de detectar uma ampla faixa de intensidades de corrente, variando de poucos miliamperes a dezenas de amperes. A solução proposta é do tipo *plug-and-play* e não requer qualquer modificação na instalação elétrica do ambiente.

Devido à originalidade do trabalho, referências a soluções similares são raras na literatura. Um grupo francês publicou alguns artigos [19]-[21] e submeteu uma patente [22] sobre uma etiqueta com sensor RFID para a detecção da corrente elétrica de dispositivos conectados a tomadas de energia elétrica residenciais.

Distintamente da solução apresentada neste trabalho, o dispositivo necessita da modificação do cabo de energia com a adição de uma etiqueta passiva de RFID para utilização em campo próximo, capacitores e uma chave liga-desliga. A etiqueta é acoplada magneticamente ao cabo e sua ação muda o estado da chave liga-desliga, conforme a passagem da corrente elétrica. Os capacitores operam para alterar as características de

transmissão do cabo, modificando o comportamento da etiqueta, que tem a sua operação iniciada em campo próximo. Dessa forma, a detecção da etiqueta pelo sistema RFID associado e, conseqüentemente do consumo de energia, torna-se possível. No entanto, essa proposta requer mudanças no processo de fabricação, já que exige a incorporação da etiqueta no cabo, o que é tecnicamente diferente da solução aqui sustentada.

Em [23], os autores apresentam uma etiqueta passiva de RFID para a monitoração de correntes de 1,5 A até 10 A em tomadas de energia elétrica em residências com resolução de 0,5 A. Uma versão aprimorada é apresentada em [24]. Essa etiqueta, com estimativa de valor de 50 dólares estadunidenses, é comparada favoravelmente, em termo de custo e complexidade, a alternativas comerciais que adotam outras tecnologias [25]–[28]. No entanto, o dispositivo é maior, menos sensível, mais complexo e mais caro que a solução proposta neste trabalho.

As patentes [29] e [30] propõem a colocação de circuitos eletrônicos de detecção, leitores de RFID e outros componentes dentro das tomadas de energia elétrica, o que aumenta a complexidade de implementação do sistema de monitoração do consumo de energia elétrica, requerendo modificações físicas significativas. Além disso, também há diferenças técnicas em relação à solução ora defendida que fazem com que esta seja relativamente mais barata.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2, abordam-se as bases teóricas que fundamentam o desenvolvimento de uma EPSCE. Etiquetas que operam como sensores RFID são descritas. Os elementos de um sistema RFID que opera na faixa de UHF (*Ultra High Frequency*) e aspectos de RF (radiofrequência) de uma etiqueta passiva são apresentados.

O projeto de uma EPSCE é descrito no Capítulo 3. Detalhes do funcionamento da EPSCE, de medições para a caracterização dos componentes utilizados, do *layout* da PCI (Placa de Circuito Impresso) e do encapsulamento da etiqueta são apresentados.

No Capítulo 4, mostram-se os resultados de testes funcionais com lâmpadas incandescentes, utilizadas como cargas. Testes de campo com cargas reais, equipamentos eletrodomésticos, são apresentados. Conclusões e sugestões para a continuidade deste trabalho são indicadas no Capítulo 5.

CAPÍTULO 2

EPSCE – ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, descrevem-se as características de uma EPSCE para operação na faixa de frequências de UHF. Na Seção 2.1, apresentam-se os elementos básicos de sistemas RFID em UHF e etiquetas que atuam como sensores. Na Seção 2.2, descrevem-se os aspectos de RF que envolvem a operação de uma etiqueta passiva em um sistema RFID em UHF. O princípio de funcionamento de uma EPSCE é discutido na Seção 2.3.

2.1. ELEMENTOS BÁSICOS DE SISTEMAS RFID E ETIQUETAS COMO SENSORES

Sistemas RFID são utilizados para a identificação de objetos ou pessoas através da comunicação sem fio entre dois principais componentes: leitor(es) e etiqueta(s). Além destes, o sistema de identificação é composto por uma infraestrutura local, p. ex., um computador, onde um software de gerenciamento e monitoração é instalado, que se comunica com uma rede interna ou externa [1]. Na rede, outros computadores podem ter acesso aos dados de identificação da(s) etiqueta(s) coletados por um ou mais leitores para, por exemplo, alimentar sistemas de planejamento de recursos (ERP).

Por ser uma tecnologia de transmissão de dados sem contato e em virtude da não necessidade de linha de visada entre os leitores e as etiquetas, RFID tem sido largamente utilizada para controle de acesso de pessoas, rastreamento de objetos em logística e monitoramento de processos industriais variados. Em anos recentes, RFID também tem sido considerada uma importante tecnologia para a implementação de sistemas de monitoração na Internet das Coisas [31]-[33].

Na camada física, leitores e etiquetas estabelecem a comunicação entre si por meio de pelo menos duas diferentes formas de acoplamento entre suas antenas. Em faixas de frequências baixas, LF (*Low Frequency*) e HF (*High Frequency*), sistemas RFID operam em campo próximo e a comunicação de sinais entre leitor(es) e etiqueta(s) ocorre por acoplamento indutivo entre suas antenas [1].

Para frequências mais elevadas, UHF e SHF (*Super High Frequency*), a transferência de energia entre as antenas do leitor e da etiqueta ocorre em campo distante por acoplamento eletromagnético [1]. A comunicação da etiqueta com o leitor se dá através

da técnica de modulação por retro espalhamento (*backscattering modulation*), semelhante à dos sistemas de radar [1]. Em todos os casos, sistemas RFID operam em faixas de frequências não licenciadas, atribuídas a aplicações industriais, científicas e médicas (ISM – *Industrial, Scientific, and Medical*).

Dado que ambas as formas de acoplamento, indutivo ou eletromagnético, podem ser utilizadas para detectar diversos parâmetros físicos dos objetos etiquetados [34], RFID é uma tecnologia com potencial elevado para fornecer soluções de sensoriamento inteligente e tratar problemas sofisticados. Pode ser implementada com vantagens na monitoração de sistemas suportados pela IoT.

Etiquetas-sensores RFID são especialmente desenvolvidas para possuir funções de monitoração de parâmetros físicos dos objetos, seja pela inclusão de sensores em seus circuitos [34] seja pela mudança das características eletromagnéticas da antena [35–37]. Atuam com sensores para diferentes propósitos: medição de força, pressão, corrosão e fissuras em materiais, temperatura, umidade, consumo de energia elétrica, etc. [38–42].

Para operar como sensores, as etiquetas de RFID podem conter diferentes componentes eletrônicos como, p. ex., conversores analógico-digital e micro controladores. Neste caso, a etiqueta atua como a interface de comunicação com o sistema para a transmissão dos dados resultantes da monitoração [34].

Além disso, as antenas de etiquetas-sensores RFID podem ser construídas com materiais que alteram suas características eletromagnéticas em função do parâmetro a ser monitorado [34]. Variações no nível de potência do sinal transmitido no canal são identificadas no leitor de forma a reconhecer as mudanças do parâmetro.

Com o intuito de compreender as possíveis vantagens e limitações de etiquetas-sensores RFID, apresentam-se, a seguir, de forma sucinta, os elementos de um sistema RFID em UHF, com ênfase na descrição das etiquetas.

Na Figura 2.1 destacam-se os principais elementos de um sistema RFID típico [43]. As etiquetas são colocadas nos objetos para conferir uma identidade única aos mesmos. O leitor encontra-se conectado a um computador que faz parte de uma rede onde as informações podem ser acessadas remotamente.

Na Tabela 2.1, mostram-se as principais faixas de frequência para sistemas de RFID e as distâncias típicas de leitura das etiquetas, resultantes da operação em campo próximo e campo distante [44].

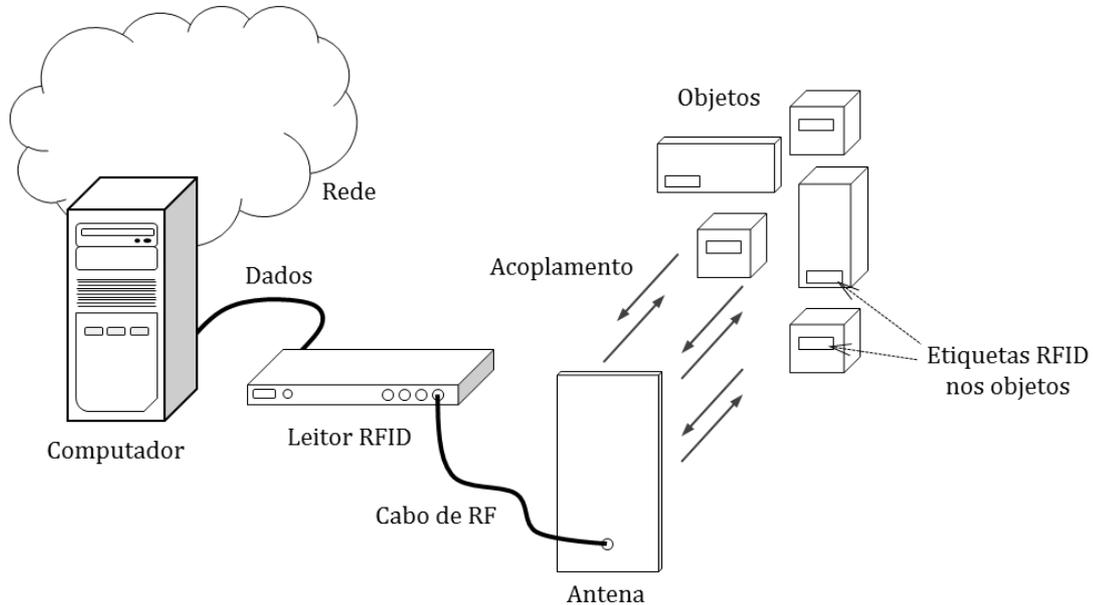


Figura 2.1 – Elementos básicos de um sistema RFID.

Tabela 2.1 – Frequências de RFID e distâncias de leitura

| Banda | Frequências | Distância de leitura no Espaço Livre |
|-------|-----------------|--------------------------------------|
| LF | 125 - 134,3 kHz | < 10 cm |
| HF | 13,56 MHz | < 1 m |
| UHF | 860 - 960 MHz | 1 - 12 m |
| SHF | 2,45/5,8 GHz | ≤ 100 m (etiqueta ativa) |

LF: *Low Frequency* – HF: *High Frequency* – UHF: *Ultra High Frequency* – SHF: *Super High Frequency*

No que diz respeito às etiquetas, existem três tipos distintos definidos de acordo com a forma como os seus componentes eletrônicos são alimentados por uma fonte de energia, de corrente contínua. As etiquetas podem ser:

- (a) Passivas – São etiquetas que não possuem uma bateria como fonte de alimentação. Neste caso, a energia para alimentação dos circuitos eletrônicos integrados em um único circuito (CI) é oriunda da potência do sinal de RF emitido pelo leitor que incide sobre a antena da etiqueta. Na classificação da EPCglobal, etiquetas passivas podem ser de classe 1 ou 2 [45]. O tipo de classe depende da quantidade de processos que podem ser incorporados na etiqueta e tratados pelo sistema, como, p. ex., autenticação. Em virtude de sua simples

constituição (CI + antena), etiquetas passivas são as de menor custo e com uso preferencial em sistemas RFID.

- (b) Ativas – Constituem uma classe de etiquetas que contém uma fonte, uma bateria, para a alimentação dos circuitos eletrônicos. Com a disponibilidade da energia da fonte, etiquetas ativas podem transmitir sinais para o leitor em distâncias elevadas, até cerca de 100 m. Etiquetas ativas são classificadas como de Classe 4 pela EPCglobal [45]. Em geral, são de maior custo que as etiquetas passivas e portanto com aplicação bastante restrita em sistemas RFID.
- (c) Semipassivas (ou semiativas) – São etiquetas que, como as ativas, possuem uma fonte que fornece energia para o funcionamento dos circuitos eletrônicos internos de um CI. Contudo, a energia da fonte não é utilizada na comunicação da etiqueta com o leitor. A etiqueta não tem um circuito dedicado para a transmissão de sinais de RF. A comunicação com o leitor é idêntica à das etiquetas passivas, ou seja, por retro espalhamento, sem qualquer alteração do enlace reverso (da etiqueta para o leitor). Com o uso da fonte, a melhoria no desempenho ocorre no enlace direto (do leitor para a etiqueta), já que a etiqueta tem sua sensibilidade aumentada. Pode receber sinais do leitor em distâncias maiores que as atingidas com o emprego de etiquetas passivas. Permanece em estado de dormência até ser ativada pelo sinal de RF oriundo do leitor, estratégia que conserva a energia da bateria e aumenta sua vida útil. Etiquetas semipassivas são de Classe 3 para a EPCglobal [45]. Com custo e desempenho intermediário entre passivas e ativas, etiquetas semipassivas são, em geral, consideradas como primeira opção para aplicação em objetos em que há dificuldades de identificação.

Todas as etiquetas de RFID possuem um número, em geral armazenado em uma memória, que é atribuído pelo sistema a um dado objeto para identificá-lo de forma única. Este número é denominado de EPC (*Electronic Product Code*) e é formado a partir de regras específicas estabelecidas pela EPCglobal [46].

De forma geral, o EPC é uma palavra de 96 *bits* [46]. Além do EPC, diversas outras informações do objeto podem ser armazenadas na memória da etiqueta. No entanto, por simplificação, muitas dessas informações são armazenadas em um banco de dados para o

qual o EPC identificado na etiqueta aponta, extraindo outras características associadas ao objeto.

Do ponto de vista da operação como etiquetas-sensores RFID, as passivas, que necessitam da conversão da energia de RF coletada pela antena em fonte de alimentação de corrente contínua para o CI, têm seu desempenho reduzido pelo consumo de componentes adicionais. Isto representa um grande desafio para o desenvolvimento de etiquetas-sensores RFID passivas, de baixo custo.

A disponibilidade de uma fonte de alimentação (bateria) faz das etiquetas ativas e semipassivas alternativas com maior viabilidade para a implementação como sensores. Contudo, técnicas de coleta de energia (*energy harvesting*) eletromagnética têm sido objeto de pesquisas ao longo dos anos recentes e podem ser aplicadas no desenvolvimento de etiquetas-sensores RFID passivas. Também, como visto anteriormente, antenas que atuam como sensores eletromagnéticos para a monitoração de parâmetros constituem um amplo campo de pesquisa com resultados aplicáveis em etiquetas-sensores RFID passivas.

2.2. ASPECTOS DE RF EM SISTEMAS RFID COM ETIQUETAS PASSIVAS

O processo de identificação de uma etiqueta passiva por um leitor de RFID em UHF pode ser resumido em três passos principais [43]:

- P1 – A portadora, onda incidente sobre a antena da etiqueta, está sempre sendo transmitida pelo leitor durante a comunicação em modo CW (*Continuous Wave*) ou modulada por sinais de comandos do sistema. A etiqueta recebe e retifica a portadora modulada ou não, emitida pela antena do leitor, e gera uma tensão contínua para a alimentação do CI.
- P2 – O leitor requisita informações da etiqueta por meio de comandos (p. ex., o comando Query) codificados, que modulam a portadora.
- P3 – A etiqueta responde ao questionamento do leitor através da alteração da impedância do CI conectado à antena, entre dois diferentes valores, Z_1 e Z_2 . A variação dos valores de impedância altera o RCS (*Radar Cross Section*) da etiqueta [47] e, dessa forma, modula a onda incidente que é retro espalhada pela antena no canal. O sinal recebido é demodulado e a informação é decodificada no leitor.

No sistema, a comunicação entre o leitor e a etiqueta é do tipo *half-duplex*. Isto é, não ocorre nenhum processo de demodulação ou decodificação na etiqueta dos comandos enviados pelo leitor quando a mesma está transmitindo as informações requisitadas.

Na Figura 2.2, são mostrados o leitor, a etiqueta passiva e sinais que trafegam no canal de comunicação. Também é apresentado o ciclo de leitura da etiqueta. A portadora encontra-se sempre presente no canal e é modulada pelo sinal de interrogação (comando Query) do leitor no enlace direto e pela resposta da etiqueta, por retro espalhamento, no enlace reverso [44].

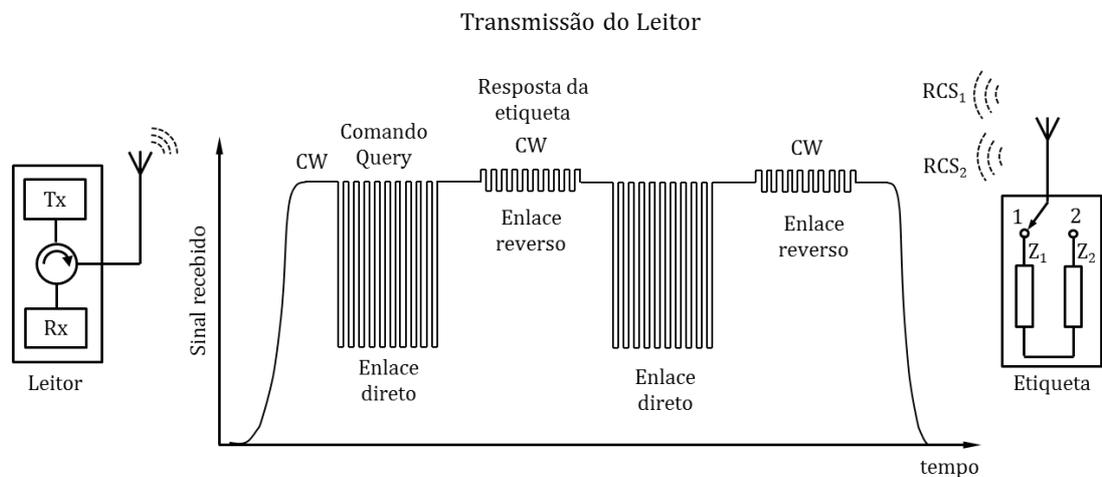


Figura 2.2 – Ciclo de leitura de uma etiqueta de RFID em UHF.

Do ponto de vista de RF, a operação e o desempenho do sistema são limitados por dois parâmetros principais: (1) a potência transferida para o CI na etiqueta, emitida pela antena do leitor; e (2) a potência recebida pelo leitor, retro espalhada pela antena da etiqueta.

A despeito de outros fatores que afetam o desempenho como, por exemplo, os relativos à propagação das ondas eletromagnéticas e a sua interação com o meio [48], dois parâmetros relevantes são as sensibilidades (em potência) ou limiares de recepção dos sinais na etiqueta (P_{tag}), e no leitor (P_{thL}).

Em geral, o limiar de recepção da etiqueta é determinado pela sensibilidade do CI, P_{thE} , uma vez que a maioria das antenas comumente desenvolvidas possuem ganho aproximadamente igual a 0 dBi, o que resulta em $P_{tag} \approx P_{thE}$.

Em um sistema RFID, o processo de identificação de um objeto é iniciado pelo leitor, que questiona a etiqueta através do envio do comando Query que modula a

portadora, como visto na Figura 2.2. Se o sinal emitido pelo leitor e que trafega pelo meio de propagação incide sobre a antena com potência insuficiente, ou seja, abaixo do limiar de recepção do CI, este não recebe a energia mínima para ativar seus circuitos internos e a etiqueta não irá responder. Em consequência, o objeto não será identificado.

Na Figura 2.3, é apresentado o diagrama de blocos de uma etiqueta passiva típica de RFID em UHF onde observa-se o circuito retificador do CI conectado aos terminais da antena da etiqueta [43]. A função do retificador é converter o sinal de RF recebido nos terminais do CI em uma tensão contínua que alimenta os outros circuitos internos. Como em qualquer retificador, o processo de retificação possui uma dada eficiência que é considerada na determinação do limiar de recepção do CI.

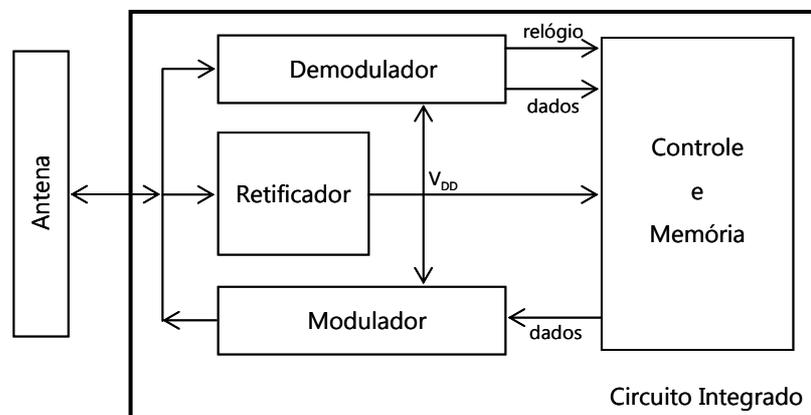


Figura 2.3 – Diagrama de blocos de uma etiqueta de RFID em UHF.

Na análise de um sistema de RFID em UHF típico, operando no espaço livre, o balanceamento de potência (*link budget*) nos enlaces [43] é mostrado na Figura 2.4.

No enlace direto, a potência radiada pela antena (soma da potência de entrada P_{TX} e do ganho da antena G_{TX}) diminui com a distância normalizada $4\pi d/\lambda$ até o ponto onde se encontra a etiqueta passiva. Na etiqueta, o ganho de sua antena G_A é acrescido à potência recebida e o resultado é P_{tag} , que deve ser superior à sensibilidade do CI, P_{thE} . Se P_{tag} for menor que P_{thE} , a etiqueta não será identificada pelo sistema.

No enlace reverso, a potência retro espalhada pela antena da etiqueta acrescida do ganho da antena do leitor G_{RX} deve ser superior à sensibilidade P_{thL} . Caso P_{RX} seja menor que P_{thL} , a etiqueta não será identificada pelo sistema.

Na Figura 2.4, observa-se que o limiar de recepção da etiqueta P_{thE} é muitas vezes maior que o do leitor. Quando etiquetas passivas são utilizadas, um dos mais importantes fatores que limitam a operação do sistema é o limiar de recepção do CI. Dessa forma,

conclui-se que, em geral, sistemas RFID em UHF com etiquetas passivas são limitados em potência no enlace direto.

Do exposto, observa-se que, em etiquetas passivas, a inclusão de circuitos eletrônicos (p. ex., sensores), que necessitam de uma fonte de alimentação para funcionar, irá requerer uma fonte de energia, que, no caso, é obtida apenas da conversão de RF em CC (Corrente Contínua) captada pela antena. Isto resulta em um aumento do valor do limiar de recepção do CI e na diminuição da área de cobertura do leitor, o que, em geral, é indesejável em um sistema RFID em UHF. Portanto, etiquetas-sensores RFID passivas apresentam essa importante restrição para o desenvolvimento de soluções que incorporam circuitos adicionais.

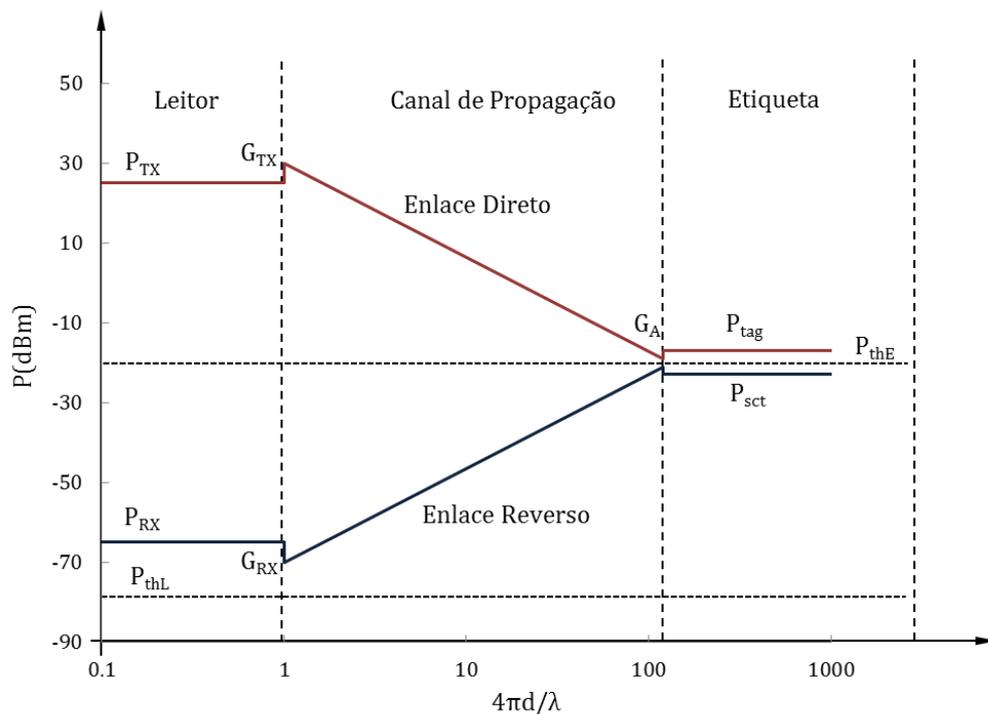


Figura 2.4 – *Link budget* dos enlaces direto e reverso de um sistema RFID em UHF.

No processo de desenvolvimento de uma etiqueta passiva, outros parâmetros, além da sensibilidade do CI, devem ser considerados de forma a diminuir as perdas de potência de RF. Eles são o ganho e a impedância da antena, a ser casada com a do CI para minimizar as perdas por reflexão. A influência desses parâmetros pode ser analisada, considerando o conceito de área efetiva de uma antena [49].

Em geral, o conceito de área efetiva de uma antena aplica-se quando ela atua como receptora de ondas eletromagnéticas e encontra-se conectada com uma impedância de carga $Z_L = R_L \pm jX_L$ em seus terminais. Nessas condições, a área efetiva é definida por

$$A_e = \frac{P_L}{S} \quad (2.1)$$

sendo P_L a potência dissipada em R_L e S , a densidade de potência da onda incidente.

Para qualquer antena sem perdas, a máxima área efetiva pode ser determinada por

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D \quad (2.2)$$

onde, λ é o comprimento de onda e D é a diretividade.

A antena possui uma impedância $Z_A = R_A \pm jX_A$, onde a parte real é a soma de duas resistências, a de radiação R_r e a de perdas na estrutura R_l , ou seja, $R_A = R_r + R_l$ e uma reatância, X_A , que pode ser indutiva ou capacitiva.

Quando irradiada pela onda incidente com densidade de potência S , a antena gera em seus terminais uma tensão induzida V , que leva ao modelo de circuito equivalente [50] apresentado na Figura 2.5, onde a antena encontra-se carregada por Z_L .

A corrente que circula por Z_A e Z_L é dada por

$$I = \frac{V}{Z_A + Z_L} \quad (2.3)$$

e a potência dissipada em R_L é determinada por

$$P_L = \frac{1}{2} R_L |I|^2 = \frac{1}{2} R_L \left| \frac{V}{Z_A + Z_L} \right|^2 \quad (2.4)$$

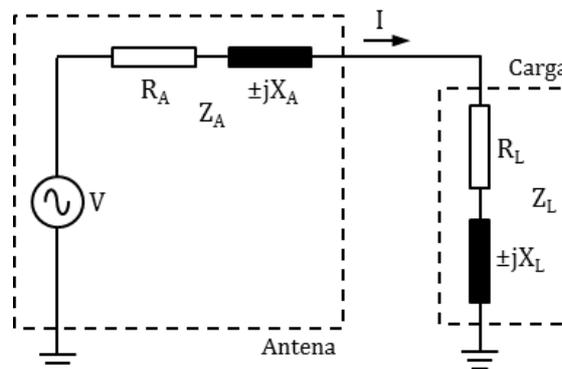


Figura 2.5 – Circuito equivalente de uma antena receptora conectada a uma carga.

No circuito da Figura 2.5, a máxima transferência da potência recebida na antena para a carga ocorre no casamento entre suas impedâncias, ou seja, quando Z_L é o complexo conjugado de Z_A ($Z_L = Z_A^*$). Neste caso, as potências máximas dissipadas na carga e na antena são dadas por,

$$P_{Lm} = P_{Am} = \frac{|V|^2}{8R_A} \quad (2.5)$$

O casamento de impedâncias entre a antena e a carga pode ser determinado pelo coeficiente de reflexão (Γ), que relacionada as amplitudes complexas das ondas incidente e refletida sobre uma carga ou uma porta de um dispositivo.

Para o circuito equivalente da Figura 2.5, a não existência de linhas de transmissão entre a antena e a carga, como é caso em uma etiqueta passiva de RFID onde o CI está conectado diretamente aos terminais da antena, leva à definição do coeficiente de reflexão de potência, introduzido por Kurokawa [51] e dado por

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_A^*}{Z_L + Z_A} \quad (2.6)$$

Com (2.6) aplicada em (2.4), obtém-se a potência dissipada na carga, dada por

$$P_L = \frac{R_L |V|^2}{8R_A^2} |1 - \Gamma|^2 \quad (2.7)$$

A razão entre as potências dissipadas na carga, dada por (2.7), e na antena, em (2.5), define o coeficiente de transmissão,

$$\tau = \frac{P_L}{P_{Am}} = \frac{R_L}{R_A} |1 - \Gamma|^2 \quad (2.8)$$

Com (2.6) em (2.8), a relação entre os coeficientes de transmissão e de reflexão é,

$$\tau = 1 - |\Gamma|^2 \quad (2.9)$$

Na condição de reflexão total, quando a onda incidente é completamente refletida pela carga, a magnitude do coeficiente é igual a um ($|\Gamma| = 1$). Neste caso, não há nenhuma transferência de potência entre o gerador, a antena na Figura 2.5, e a carga e o coeficiente de transmissão é nulo ($\tau = 0$).

Para reflexão nula, quando a potência da onda incidente é totalmente dissipada na carga, o coeficiente é igual a zero ($\Gamma = 0$) e ocorre a máxima transferência de potência do

gerador para a carga ($\tau = 1$). Em quaisquer outros casos, a reflexão é parcial ($|\Gamma| > 0$) e alguma parcela da potência é transferida para a carga ($\tau < 1$).

Quando as perdas na antena não podem ser desconsideradas, e há descasamento entre sua impedância e a da carga ($0 < |\Gamma| < 1$ ou $0 < \tau < 1$), a área efetiva é dada por,

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \tau G \quad (2.10)$$

onde $G = \eta D$ é o ganho da antena e η é a eficiência de radiação, que leva em consideração as perdas ($R_l \neq 0$) na antena.

No projeto da EPSCE, a equação (2.10) representa a base do desenvolvimento do etiqueta através da variação da transferência de potência da antena para o CI. Em outras palavras, por meio da alteração do coeficiente τ , torna-se possível a detecção ou não da EPSCE pelo sistema.

Para um dado ambiente de propagação de sinais de RFID, é possível estimar, como para qualquer outro sistema de comunicações, uma distância máxima a partir da qual uma etiqueta deixa de ser identificada. Isto ocorre em virtude do nível de potência recebida ser menor que o limiar de recepção no CI, no enlace direto ou no leitor, no enlace reverso.

Para o espaço livre, a densidade de potência transmitida é dada por

$$S = \frac{G_T P_T}{4\pi d^2} \quad (2.11)$$

onde G_T é o ganho da antena de transmissão, P_T é a potência nos terminais da antena e d é a distância entre o transmissor (leitor) e o receptor (etiqueta).

A potência recebida nos terminais do CI na etiqueta pode ser determinada por

$$P_R = S A_e \quad (2.12)$$

Com (2.10) e (2.11) em (2.12), obtém-se a distância máxima, para a qual $P_R = P_{thE}$,

$$d_m = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T G_T G \tau p}{P_{thE}}} \quad (2.13)$$

Em (2.13), o fator p é introduzido para caracterizar a polarização entre as antenas do leitor e da etiqueta, variável entre 0 (polarização cruzada) e 1 (mesma polarização). Em sistemas RFID, é comum a utilização de antenas com polarização circular para a leitura das etiquetas. Neste caso, uma vez que as antenas do leitor e da etiqueta estejam colocadas

em planos paralelos, o valor máximo de p é igual a 0,5 que implica em uma redução de 30% no valor de d_m [47].

A distância máxima em (2.13) representa o limite superior a partir do qual uma etiqueta deixa de ser identificada pelo sistema. Abaixo desse limite, desconsiderando outras perdas, além da resultante do espaço livre, a etiqueta é identificada pelo sistema.

Como pode ser observado em (2.13), a distância máxima depende do coeficiente de transmissão de potência do sinal recebido na antena da etiqueta para o CI. Alterações no valor de τ mudam o limite superior de distância e, em consequência, o estado de detecção/identificação da etiqueta.

2.3. FUNCIONAMENTO DA EPSCE

Como mencionado anteriormente, a função da EPSCE em um sistema RFID em UHF é detectar a existência do consumo de energia elétrica por aparelhos eletroeletrônicos. Em um ambiente doméstico típico, um sistema RFID para a monitoração do consumo de energia é mostrado na Figura 2.6, onde as EPSCEs são associadas individualmente a cada um dos eletrodomésticos conectados a uma tomada.

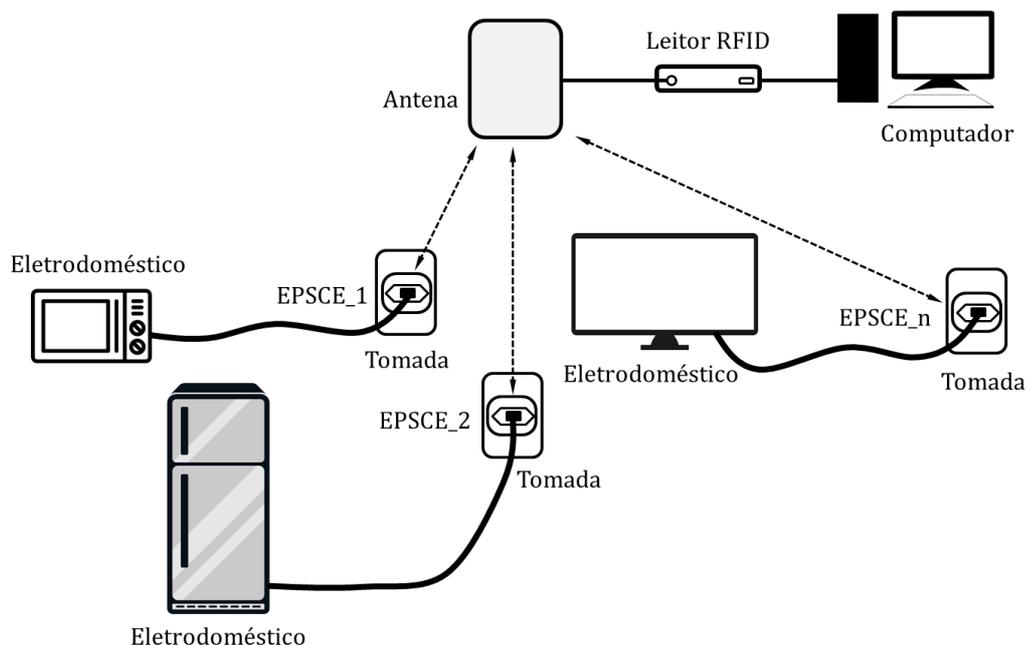


Figura 2.6 – Etiqueta com sensor de energia (corrente) elétrica e componentes do sistema.

O sensoriamento da corrente elétrica (ou do consumo de energia elétrica) que circula em um equipamento por meio de uma EPSCE foi implementado seguindo o diagrama de blocos mostrado na Figura 2.7.

Conforme descrito anteriormente, uma etiqueta passiva de RFID comum é composta de um CI e uma antena. Para a EPSCE, observa-se na Figura 2.7, a inclusão de um sensor de corrente, de um retificador e filtro, e de um circuito de RF que, em conjunto com o CI de RFID e a antena, compõem a etiqueta proposta.

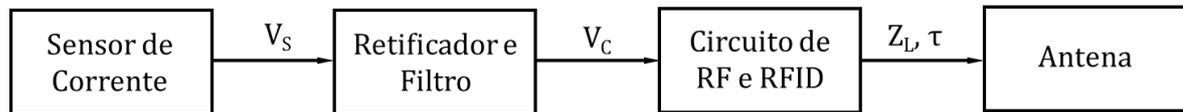


Figura 2.7 – Diagrama de blocos da EPSCE.

Conforme pode ser visto na Figura 2.7, o sensor de corrente alternada deve gerar uma tensão que, retificada e filtrada, alimenta o circuito de RF. Seu objetivo é tomar uma amostra da corrente que flui pelo cabo de alimentação de energia elétrica de um dado equipamento eletroeletrônico, ao qual a EPSCE está conectada, e desenvolver uma tensão sobre um resistor conectado aos seus terminais.

Dois diferentes tipos de sensor de corrente foram estudados como opções para utilização neste trabalho. Na primeira opção, o sensor é constituído de um indutor impresso sobre um material flexível com adesivo, semelhante a uma etiqueta comum de RFID, que pode ser colocado sobre o cabo de alimentação de um equipamento elétrico para o qual se deseja monitorar a existência de corrente elétrica [52]. O sensor e sua disposição sobre o cabo de alimentação podem ser vistos na Figura 2.8. A análise detalhada do seu funcionamento é apresentada no Apêndice.



Figura 2.8 – Sensor de corrente. Colocação sobre o cabo – Opção 1.

Na segunda opção, a adotada neste trabalho, utiliza-se um sensor de corrente comercial, apresentado na Figura 2.9. Esta opção foi escolhida em razão das dificuldades operacionais encontradas pelo autor para a impressão do indutor planar sobre um filme plástico e para a realização das conexões necessárias entre o sensor e os outros componentes da etiqueta.

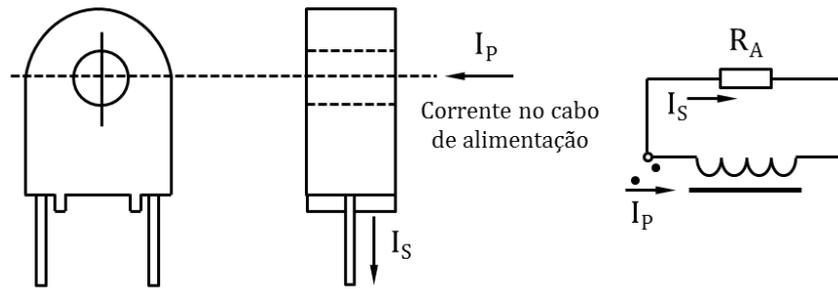


Figura 2.9 – Sensor de corrente – Opção 2.

O sensor da Figura 2.9 é constituído por um indutor que se encontra sob a influência do campo magnético gerado pela corrente que circula por um dos fios de fase do cabo de alimentação de uma carga, por exemplo, um equipamento eletrodoméstico. O campo magnético induz uma corrente elétrica com menor intensidade no circuito fechado entre o indutor do sensor e um resistor R_A colocado em seus terminais. Esta corrente, que é uma amostra da que circula no cabo de alimentação da carga, resulta em uma tensão alternada no resistor. De forma resumida, o fio de fase do cabo de alimentação e o sensor constituem um transformador de corrente.

A tensão alternada V_S , gerada pelo sensor na Figura 2.7, é retificada por um circuito de meia-onda e filtrada por um capacitor eletrolítico para gerar uma tensão contínua V_C . Proporcional a V_S , I_S e I_P , dentro dos limites de linearidade do sensor, V_C é utilizada para indicar a presença ou ausência de corrente elétrica no cabo de força do equipamento, tornando a EPSCE identificável ou não pelo sistema RFID.

A tensão contínua V_C na saída do retificador alimenta o circuito de RF cuja impedância é alterada de acordo com o seu valor. Esta alteração modifica o coeficiente de transmissão de potência entre o CI e a antena da EPSCE. Em outras palavras, variações no valor de V_C causam mudanças no casamento de impedância entre o CI e a antena da etiqueta. A alteração do casamento, e da correspondente transferência de potência, ocorre pela variação da capacitância de um diodo varactor que compõe o circuito de RF na Figura 2.7 e é função de V_C em seus terminais.

O varactor é um tipo de diodo de RF que é construído para enfatizar a variação da capacitância da região de depleção com a mudança da tensão reversa aplicada à junção PN. De forma aproximada, a capacitância da região de depleção pode ser expressa pela equação de um capacitor de placas paralelas [53],

$$C_V(V_R) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{w(V_R)} \quad (2.14)$$

onde C_V é a capacitância do varactor, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m), ϵ_r é a permissividade relativa do meio (para o silício, $\epsilon_r = 11,8$), A é a área da junção, w é a largura da região de depleção e V_R é a tensão reversa aplicada ao diodo.

Na Equação 2.14, observa-se que a capacitância do varactor é inversamente proporcional à largura da região de depleção, que é uma função crescente da tensão reversa aplicada. Logo, a capacitância C_V do varactor é uma função decrescente de V_R , como pode ser observado na Figura 2.10.

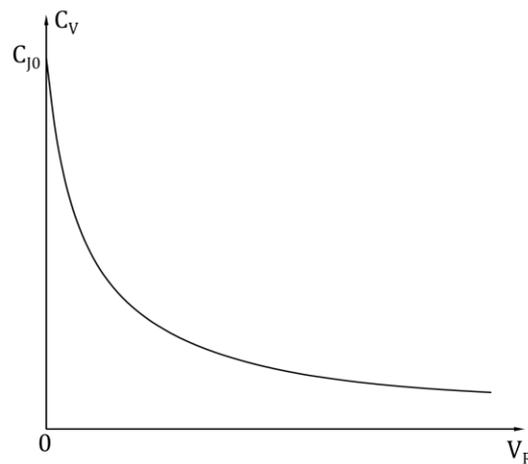


Figura 2.10 – Curva característica de um varactor.

Na Figura 2.11, é mostrada a associação das impedâncias do circuito de RF, onde está o varactor, e do CI, que constituem a carga para a antena da EPSCE.

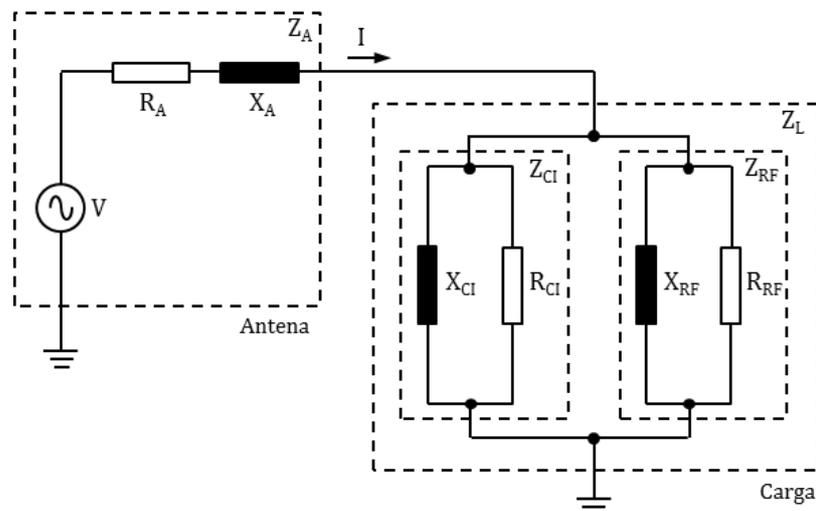


Figura 2.11 – Circuito de RF com CI de RFID (carga da antena).

No circuito da Figura 2.11, a impedância da carga Z_L , pode ser simplificada pela associação, em paralelo, das resistências e reatâncias do circuito de RF e do CI. Através da transformação paralelo-série [54], o circuito equivalente mostrado na Figura 2.12 é obtido. Nele, ambas as partes resistiva e reativa da carga são alteradas por mudanças no valor da capacitância do varactor, que é função da tensão V_C . Assim, a impedância da carga é uma função da tensão V_C , ou seja,

$$Z_L(V_C) = R_L \pm jX_L \quad (2.15)$$

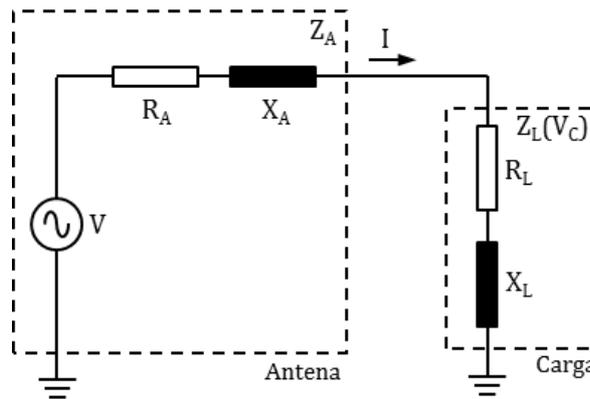


Figura 2.12 - Circuitos equivalentes da antena e da carga.

Em (2.15),

$$R_L = \frac{R_{eq}}{(1 + Q^2)} = \frac{R_{CI} // R_{RF}}{(1 + Q^2)} \quad (2.16)$$

$$X_L = \frac{X_{eq} Q^2}{(1 + Q^2)} = \frac{(X_{CI} // X_{RF}) Q^2}{(1 + Q^2)} \quad (2.17)$$

com o fator de qualidade Q dado por,

$$Q = \frac{R_{eq}}{X_{eq}} = \frac{R_{CI} // R_{RF}}{X_{CI} // X_{RF}} \quad (2.18)$$

Em consequência de (2.15), os coeficientes de reflexão em (2.6), de transmissão em (2.8) e a distância máxima de identificação em (2.13) passam a ser dependentes de V_C . Dessa forma, através da variação da tensão V_C , é possível alterar a transferência de potência da antena para o CI, que resulta na detecção ou não de uma EPSCE pelo sistema.

A descrição detalhada do projeto da EPSCE, do seu funcionamento e dos resultados obtidos em um sistema de RFID em UHF são apresentados a seguir, no Capítulo 3 deste trabalho.

CAPÍTULO 3

PROJETO E OPERAÇÃO DA EPSCE

Neste capítulo, apresentam-se o projeto e os princípios de funcionamento de uma EPSCE em um sistema RFID em UHF. Detalhes do projeto são descritos na Seção 3.1. Na Seção 3.2, é realizada uma análise do funcionamento da etiqueta no sistema. O projeto mecânico do encapsulamento da etiqueta é mostrado na Seção 3.3. Na 3.4, discutem-se os aspectos referentes à potência dos equipamentos que podem ser detectados pela EPSCE.

3.1. PROJETO DA EPSCE

Conforme mencionado antes, a EPSCE é uma etiqueta cujo projeto foi desenvolvido para operação na faixa de frequências de UHF, que se estende de 300 MHz a 3.000 MHz. Em diferentes países, segundo as suas regulamentações locais, algumas bandas dentro da faixa de UHF são destinadas para uso de sistemas RFID [55].

Para o projeto da EPSCE, apresentado neste trabalho, a faixa de operação escolhida foi a destinada para os sistemas RFID norte-americanos, ou seja, de 902,75 MHz a 928,25 MHz. Esta faixa compreende as duas diferentes bandas regulamentadas pela Anatel para operação no Brasil, que são: 902,75 MHz a 907,25 MHz (banda baixa) e 915,75 MHz a 928,25 MHz (banda alta) [55]. Dessa forma, com a escolha da faixa de frequências dos Estados Unidos para o projeto da EPSCE, sua operação também é adequada para sistemas RFID instalados no Brasil.

3.1.1. Sensor de Corrente, Retificador e Filtro

Como descrito no Capítulo 2, a opção adotada para a monitoração da corrente no projeto da EPSCE, utiliza um sensor de corrente comercial, o TA12-100 da YHDC [56], que é mostrado na Figura 3.1 e cujas características são indicadas na Tabela 3.1.

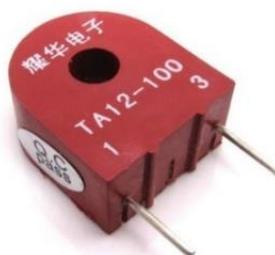


Figura 3.1 – Sensor de corrente TA12-100.

Tabela 3.1 – Características do sensor de corrente TA12-100.

| Parâmetro | Valor |
|---------------------------|---------------|
| Razão | 1000:1 |
| Corrente de entrada | 0–5A |
| Corrente de saída | 0–5mA |
| Resistência de amostragem | 200Ω |
| Tensão de amostragem | 1V |
| Não-linearidade | ≤ 0,3% |
| Defasagem | ≤ 10' |
| Frequência de operação | 20Hz a 20kHz |
| Temperatura de operação | -55°C a +85°C |

Considerando o diagrama de blocos da EPSCE na Figura 2.7, os circuitos do sensor e do retificador com o filtro, são apresentados na Figura 3.2.

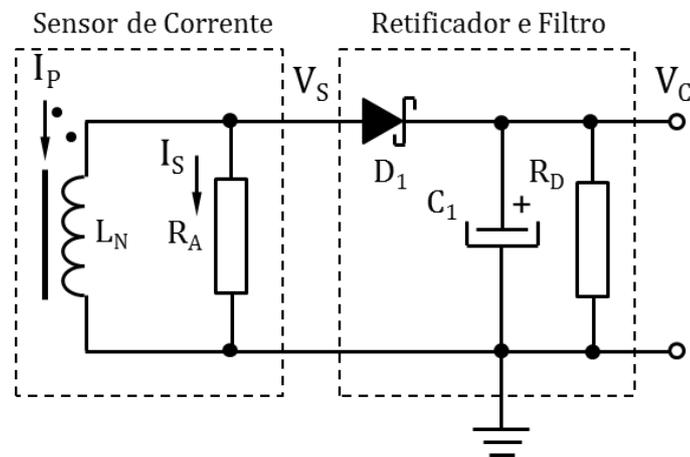


Figura 3.2 – Circuito do sensor de corrente com o retificador e o filtro.

No sensor, a tensão V_S é desenvolvida no resistor de amostragem R_A pela passagem da corrente I_S . Para cargas de baixa potência, com corrente de consumo pequena, I_S pode ser insuficiente para gerar V_S com o valor de pico necessário para que esta tensão seja retificada de forma adequada pelo diodo. Assim, para aumentar V_S , a resistência de amostragem R_A foi inicialmente alterada do valor sugerido na Tabela 3.1, de 200 Ω, para 1 kΩ. Ainda com o mesmo objetivo, ou seja, possibilitar que a EPSCE monitore o consumo de energia em cargas de baixa potência, o diodo escolhido para o retificador foi do tipo Schottky, que apresenta uma baixa queda de tensão direta. Para o projeto da EPSCE, o diodo selecionado foi o HSMS-2800 da Avago Technologies [57].

Na Figura 3.2, após a retificação de meia onda pelo diodo, a tensão resultante é filtrada por um capacitor eletrolítico $C_1 = 100 \mu\text{F}$ para a obtenção da tensão contínua V_C . A descarga do capacitor ocorre através do resistor $R_D = 100 \text{k}\Omega$.

Considerando vários valores de potência da carga, foram realizadas simulações no PSpice [58] para obtenção da tensão contínua V_C , com o sensor modelado por um transformador ideal e os componentes do retificador e do filtro especificados. O circuito utilizado nas simulações é mostrado na Figura 3.3.

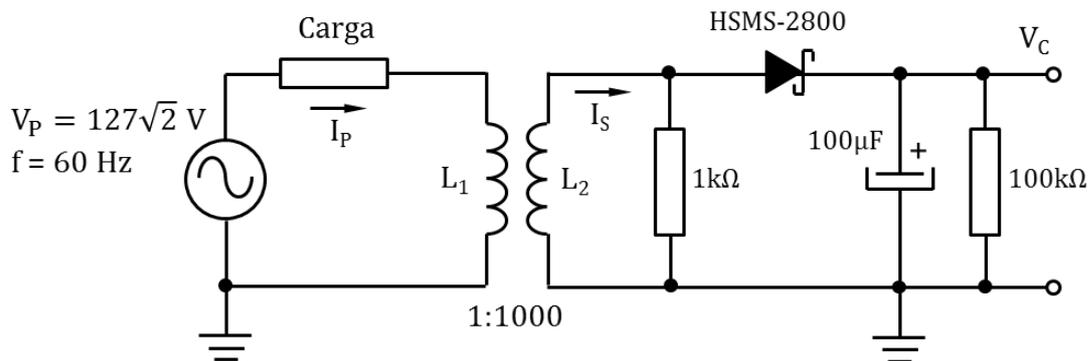


Figura 3.3 – Circuito para as simulações no PSpice.

Para validar os resultados da simulação, foram efetuados testes com cargas de diferentes potências. Nos testes, lâmpadas incandescentes e algumas associações em paralelo das mesmas foram utilizadas como cargas. O diagrama de blocos do *setup* para a medição de V_C é mostrado na Figura 3.4 e os resultados obtidos na simulação e nas medições são apresentados na Figura 3.5.

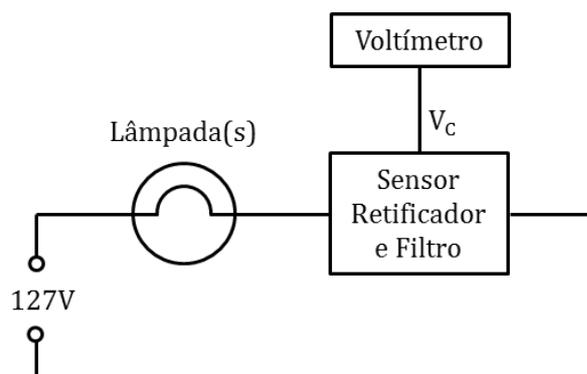


Figura 3.4 – Diagrama de blocos do *setup* de medição da tensão V_C .

A boa concordância entre resultados da simulação e das medidas, apresentados na Figura 3.5, indicam que o modelo da Figura 3.3 representa de forma bastante adequada o comportamento do sensor e do circuito retificador e filtro.

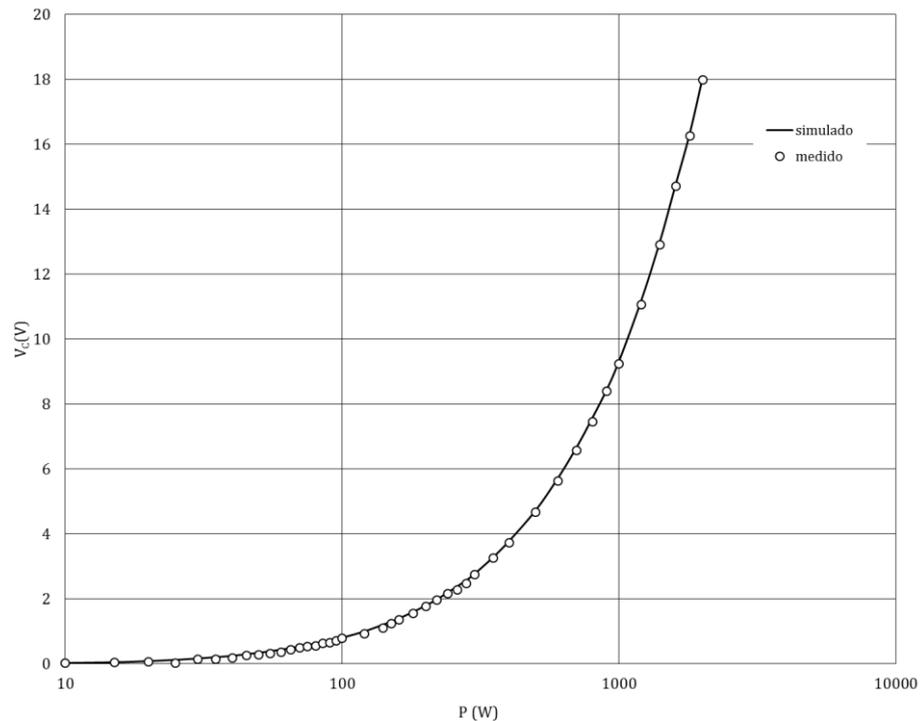


Figura 3.5 – Tensão V_c em função da potência da carga. Valores simulados e medidos.

3.1.2. Circuito de RF e RFID

A tensão contínua na saída do retificador, proporcional à corrente da carga, alimenta o circuito de RF e RFID, conforme indicado no diagrama de blocos da Figura 2.7, modificando o casamento de impedâncias entre este e a antena. Como visto no Capítulo 2, a alteração do casamento ocorre pela variação da capacitância de um diodo varactor em função da tensão contínua em seus terminais.

A impedância do CI de RFID é, em geral, modelada por uma resistência em paralelo com uma capacitância. A introdução de um varactor em paralelo com CI aumenta a capacitância da associação e diminui ambas as partes resistiva e reativa da impedância equivalente da associação.

Para atender o objetivo do projeto da EPSCE, ou seja, obter a máxima possível transferência de potência quando existe consumo por um equipamento, a redução da impedância do conjunto (CI com o varactor em paralelo) dificulta o desenvolvimento de uma antena com boa eficiência para a etiqueta, devido, em especial, à diminuição de sua parte resistiva. Com o intuito de minimizar esse efeito e possibilitar o adequado controle da impedância do conjunto, o circuito de RF não é constituído apenas pelo varactor, e outros elementos reativos, C_{R1} e L , são introduzidos, como é mostrado na Figura 3.6.

Na Figura 3.6, o capacitor C_{R1} bloqueia a passagem de corrente contínua para evitar que a tensão reversa no varactor seja igual a zero e este deixe de operar. Além disso, conectado ao indutor L e ao CI, C_{R1} e C_{R2} são dimensionados para melhorar o casamento de impedâncias entre o circuito e antena. Ainda na Figura 3.6, os elementos C_2 , L_{CK} e R_V constituem um filtro passa-baixas para impedir o vazamento do sinal de RF para a tensão de controle do varactor e podem ser desconsiderados na análise da impedância do conjunto, descrita mais adiante. Seus valores são: $C_2 = 47$ pF, $L_{CK} = 68$ nH e $R_V = 1$ k Ω .

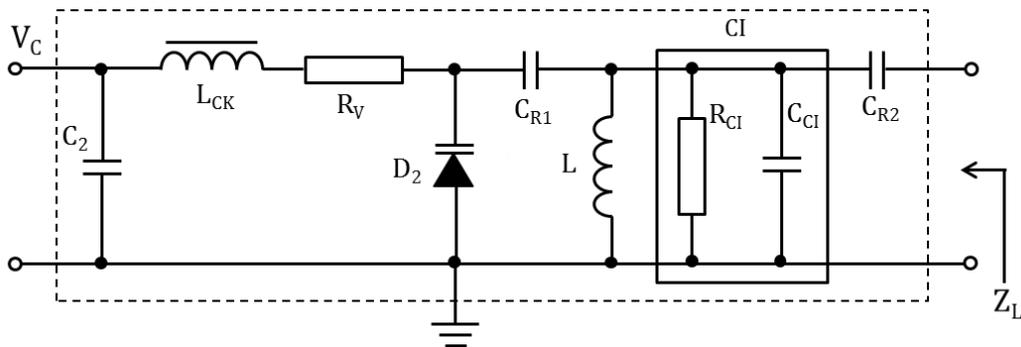


Figura 3.6 – Circuito de RF e RFID.

Para minimizar o efeito da adição de uma reatância capacitiva em excesso, um varactor com baixa capacitância foi escolhido. O SMV1231-079LF da Skyworks™ [59] atende a essa característica, com valores máximo (para $V_R = 0$) e mínimo (para $V_R = 15$ V) iguais a 1,880 pF e 0,026 pF, respectivamente. A introdução de uma capacitância parasita de 0,44 pF, em virtude do encapsulamento do componente, conforme pode ser vista no modelo simplificado do varactor [60] na Figura 3.7, eleva os valores máximo e mínimo para 2,32 pF e 0,466 pF, respectivamente.

Na Figura 3.7, são ainda apresentados outros elementos do modelo e seus valores típicos que são considerados na análise do circuito de RF.

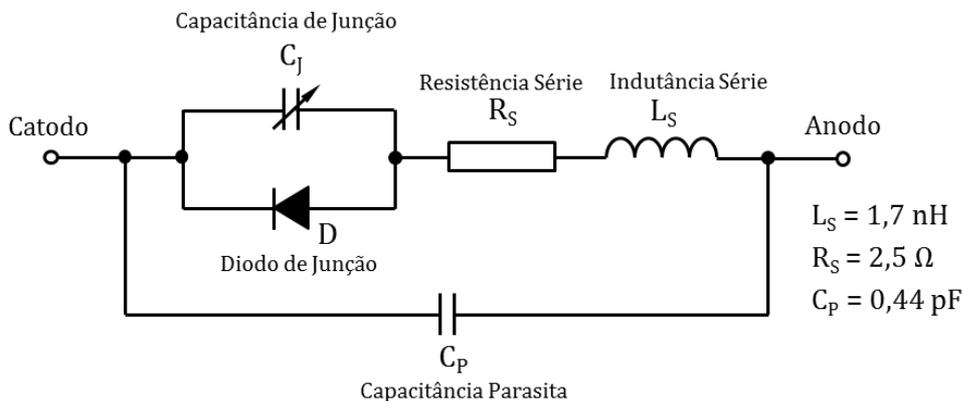


Figura 3.7 – Modelo simplificado de um varactor e valores típicos do SMV1231-079LF.

Para utilização no projeto da EPSCE, a variação da capacitância do varactor com a tensão reversa foi obtida através de medição no *setup* cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 3.8, onde estão indicados os instrumentos utilizados. Os valores obtidos na folha de especificações do SMV1231-079LF (dado), os resultantes da medição (medida) e os determinados pela equação da capacitância C_V em função de V_R [60] são apresentados na Figura 3.9. A equação de C_V , bem como os parâmetros do varactor são,

$$C_V(V_R) = C_J + C_P = \frac{C_{J0}}{\left(1 + \frac{V_R}{V_J}\right)^M} + C_P \quad (3.1)$$

com $C_{J0} = 1,88$ pF, $V_J = 10,13$ V, $M = 4,999$ e $C_P = 0,44$ pF [59].

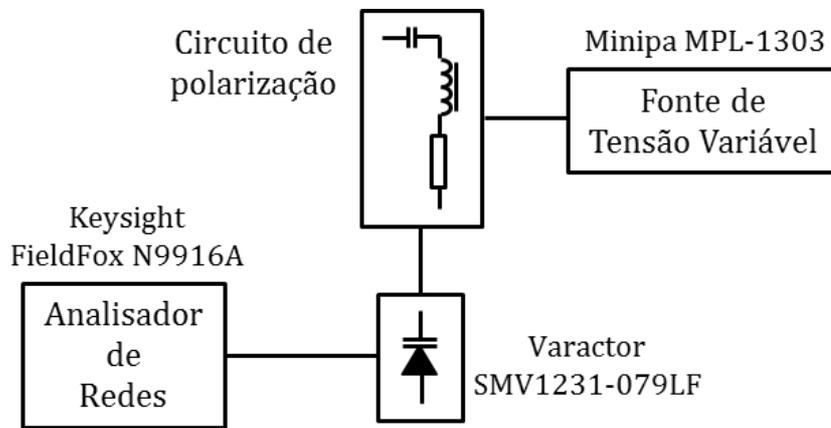


Figura 3.8 – Diagrama de blocos do *setup* de medição da capacitância do varactor.

Para a utilização na EPSCE, o CI de RFID foi escolhido pelo seu encapsulamento, para que fosse possível a sua montagem em uma placa de circuito impresso. Entre os CIs disponíveis no mercado, o Higgs™4 da Allien Technology [61] com encapsulamento SMD SOT-323 foi o selecionado. Na Figura 3.10 são mostrados o CI e os terminais de conexão em uma vista de baixo do componente.

A despeito das informações fornecidas na folha de especificações do Higgs™4, o componente foi caracterizado, em termos de RF, com o objetivo de obter o adequado funcionamento da EPSCE na faixa de frequências de operação. Os dois principais parâmetros, a sensibilidade e a impedância, foram medidas no *setup* cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.11, onde estão indicados os instrumentos utilizados.

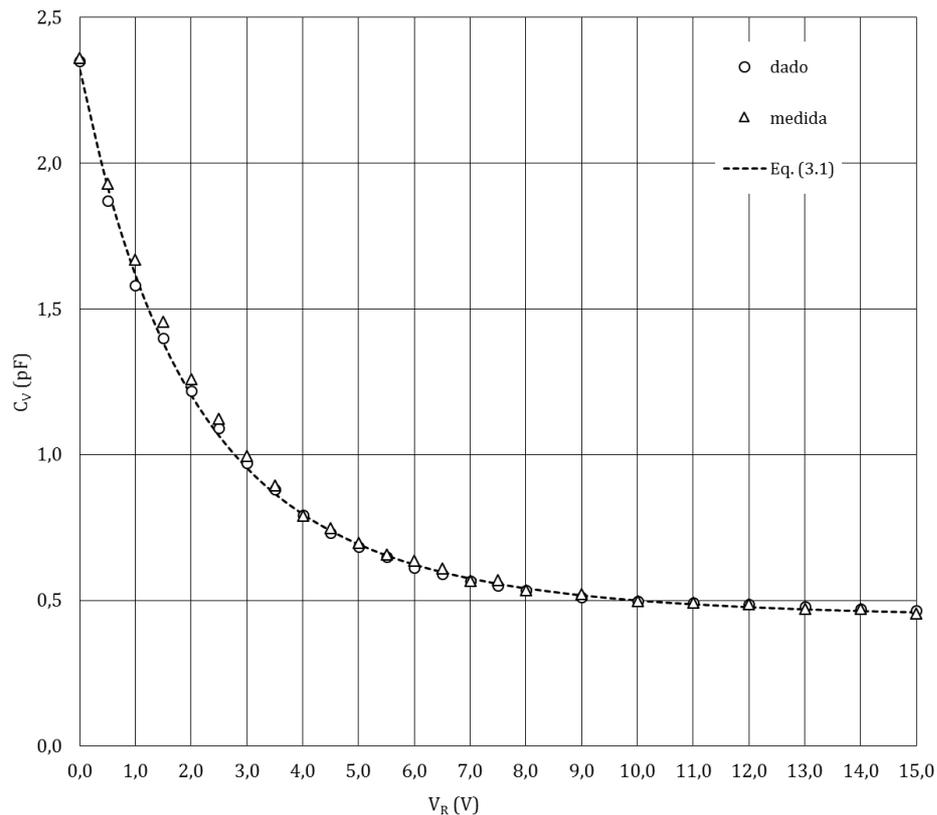


Figura 3.9 – Curva característica do varactor SMV1231-079LF.

O método de medição é semelhante ao apresentado em [62]. Com chave de RF posicionada para conectar o leitor ao CI, a potência do sinal de saída é ajustada no aplicativo de software, que é usado para configurar os parâmetros de leitura do equipamento, para um valor no qual o CI não é identificado. Em seguida, a potência é aumentada até que ocorra a identificação do CI e é medida no analisador de espectro. Após a identificação, a chave é colocada na posição de conexão do CI com o analisador de redes e a potência de saída do instrumento é ajustada para ser igual à que foi obtida no analisador de espectro.

Com a prévia calibração do instrumento, a impedância do CI é obtida. Considerando as perdas no *setup* e com os valores da potência e impedância medidos, o valor do limiar de recepção (sensibilidade) é determinado. Através da seleção de diferentes frequências no leitor, na faixa de operação, os valores da sensibilidade e da impedância foram obtidos. Os valores, apresentados na Tabela 3.2, foram adotados no projeto da EPSCE.

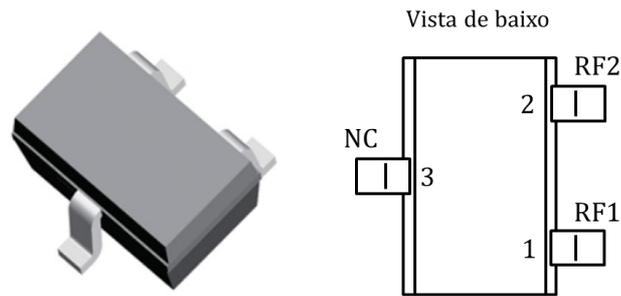


Figura 3.10 – CI Higgs™4 – encapsulamento SOT-323 e terminais de conexão.

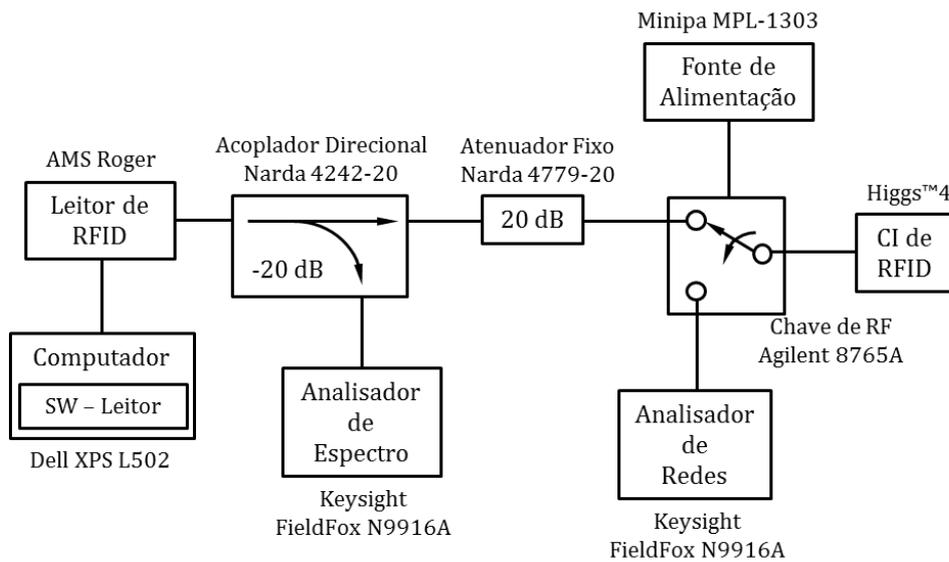


Figura 3.11 – Diagrama de blocos do *setup* para medição da sensibilidade e da impedância do CI.

Tabela 3.2 – Valores medidos do CI Higgs™4.

| Descrição | Valor | Observações |
|---|----------------|--------------------------------------|
| Faixa de medição | 902-928 MHz | |
| Sensibilidade | -18,5 dBm | Durante a leitura |
| Resistência série equivalente (R_s) | 11,36 Ω | Com -18,5 dBm de potência na entrada |
| Capacitância série equivalente (C_s) | 1,2 pF | |
| Resistência paralela equivalente (R_p) | 1.850 Ω | |
| Capacitância paralela equivalente (C_p) | 1,2 pF | |

3.1.3. Antena da EPSCE

Com o grau de liberdade para a determinação dos componentes L , C_{R1} e C_{R2} no circuito de RF e conseqüente ajuste do casamento deste com a antena, esta foi projetada para atender a duas principais restrições.

A primeira restrição foi imposta por segurança elétrica em virtude da proximidade entre uma estrutura metálica (antena) e o fio condutor de corrente alternada. A segunda, pelo espaço interno do encapsulamento mecânico da EPSCE. Com essas restrições, a antenna foi desenvolvida através do uso da ferramenta de software IE3D [63] baseada no método dos momentos.

A antenna foi desenvolvida e construída em uma chapa de bronze fosforoso com espessura de 0,3 mm e seu desenho é mostrado na Figura 3.12. Os resultados da simulação e da medida da impedância são apresentados nas figuras 3.13 e 3.14 e, para o ganho da antenna, na Figura 3.15.



Figura 3.12 – Antena da EPSCE.

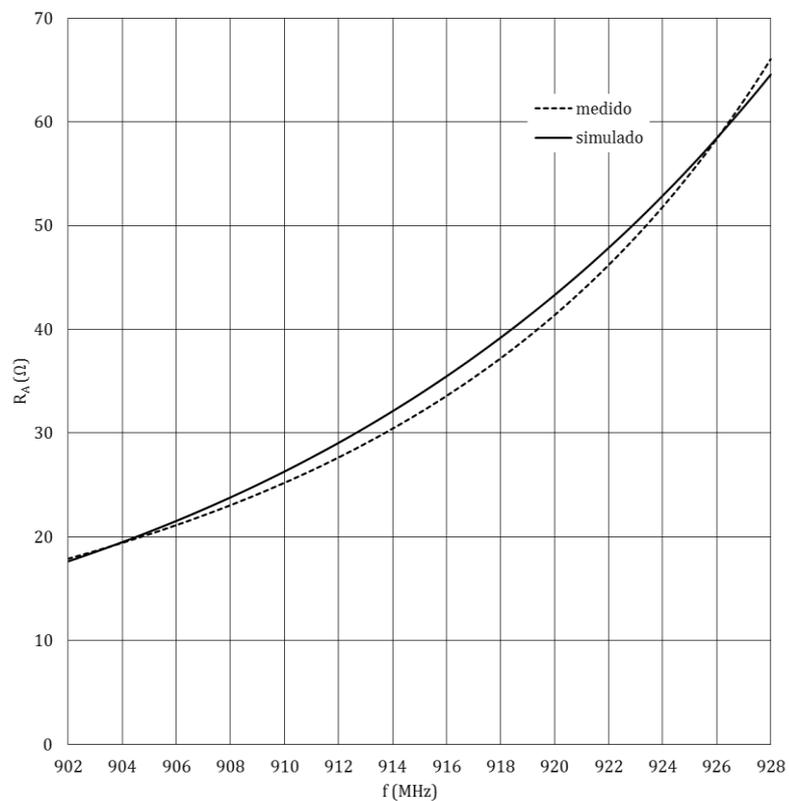


Figura 3.13 – Parte real da impedância da antenna.

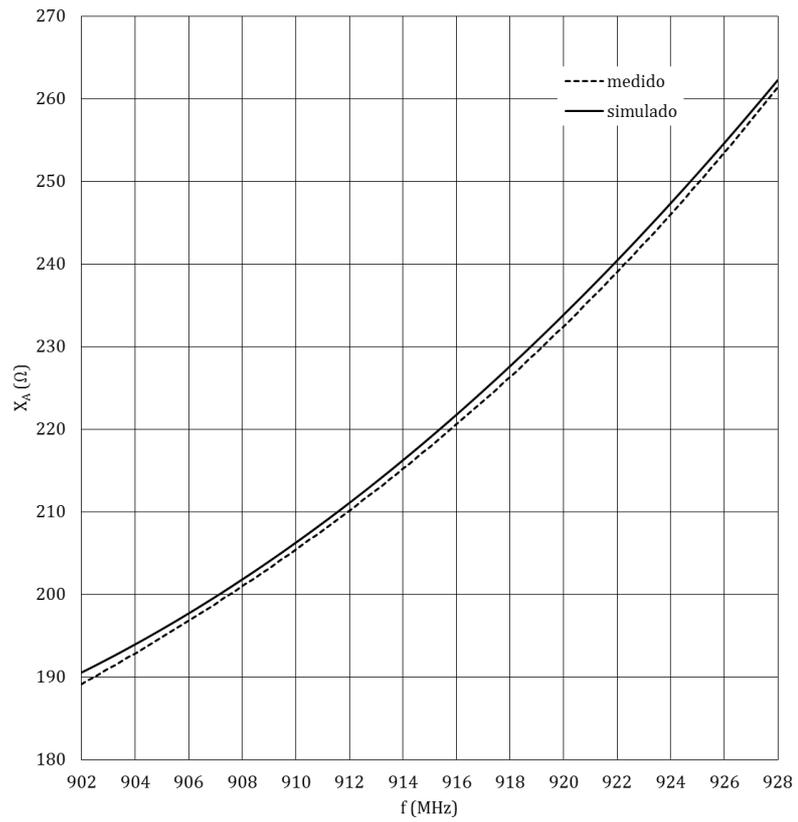


Figura 3.14 – Parte imaginária da impedância da antena.

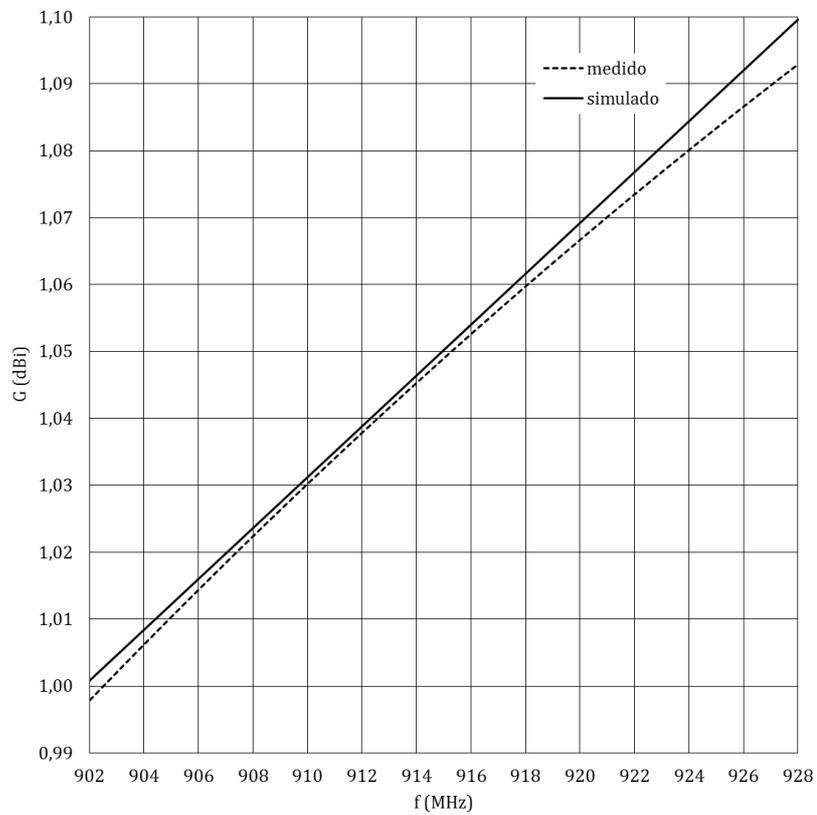


Figura 3.15 – Ganho da antena.

Os resultados, nas figuras 3.13, 3.14 e 3.15, mostram boa concordância entre os valores simulados e medidos. Além disso, indicam que a antena possui características adequadas para o desenvolvimento de uma etiqueta de RFID em UHF, com valores das partes real e imaginária da impedância bastante apropriados para o casamento com a maioria dos CIs disponíveis no mercado [64-65]. O ganho de 1 dBi (aprox.) também pode ser considerado como um bom resultado para uma antena de pequenas dimensões [66].

3.2. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA EPSCE

Na análise e no projeto de circuitos de RF em altas frequências, é muito importante considerar o *layout* da PCI. Características eletromagnéticas do substrato, comprimento e largura das trilhas, disposição física dos componentes na PCI são fatores que implicam no bom funcionamento de um dispositivo de RF.

Dessa forma, para a PCI da EPSCE com substrato de FR4, espessura de 1mm e com dupla face de cobre, o *layout* foi desenhado e é apresentado na Figura 3.16. O tamanho da PCI e a disposição do sensor de corrente na mesma foram escolhidos para que a placa pudesse ser colocada no interior da EPSCE, de acordo com o projeto mecânico a ser apresentado adiante.

Com a definição do *layout* da PCI e da determinação da impedância da antena, o circuito de RF e RFID foi simulado no Ansoft Designer SV [67] para obtenção da indutância L e das capacitâncias C_{R1} e C_{R2} .

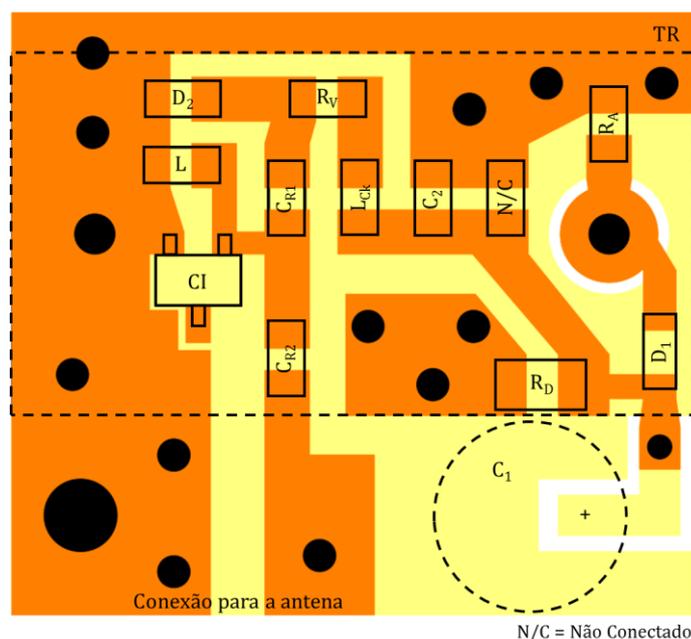


Figura 3.16 – *Layout* da EPSCE.

Na Figura 3.17, é mostrado o circuito que foi simulado, utilizando-se o modelo do varactor da Figura 3.7. Neste modelo, o diodo de junção pode ser desconsiderado, dado que a máxima excursão do nível de sinal é inferior à tensão de condução do mesmo [60]. Na simulação, foram considerados os valores de R_{CI} e C_{CI} obtidos na medição da impedância do CI, apresentados na Tabela 3.2.

Levando em consideração que o objetivo do funcionamento da EPSCE é a máxima transferência de potência entre a antena e o circuito de RF, os valores de L , C_{R1} e C_{R2} foram ajustados na simulação, na Figura 3.17, para a obtenção da impedância Z_L mais próxima possível de Z_A^* , com a variação de C_J do varactor. Os resultados das partes resistiva e reativa da impedância Z_L , parametrizadas para C_J , podem ser vistos nas figuras 3.18 e 3.19, respectivamente, para $L = 10$ nH, $C_{R1} = 2,2$ pF e $C_{R2} = 10$ pF.

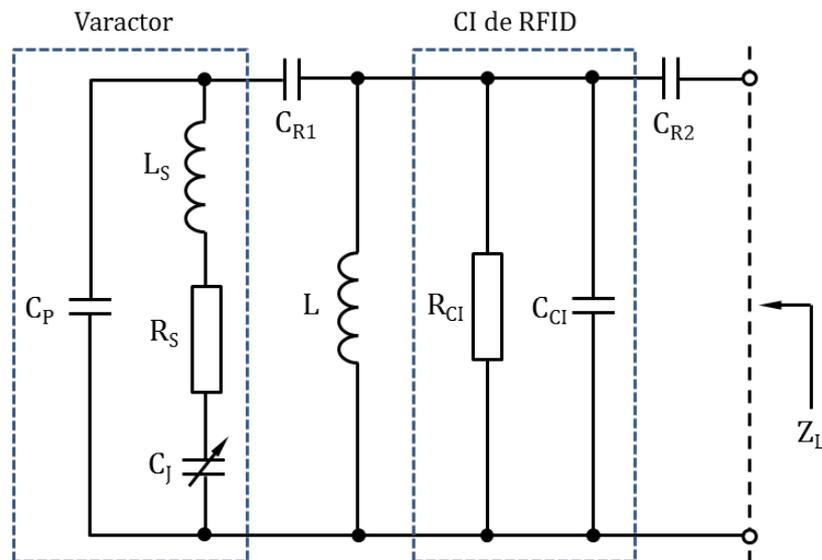


Figura 3.17 – Circuito utilizado na simulação.

Nas figuras 3.18 e 3.19, ainda são mostradas, respectivamente, as partes real e imaginária do complexo conjugado da impedância medida da antena. Observam-se vários pontos de intersecção com as curvas de Z_L , em diferentes frequências.

Isto indica que, nesses pontos de intersecção ou em frequências próximas ocorre o melhor casamento de impedâncias entre a antena e o circuito e, portanto, a máxima transferência de potência, como pode ser observado pela variação do valor de pico de τ com a frequência e com a capacitância C_J , nas curvas da Figura 3.20.

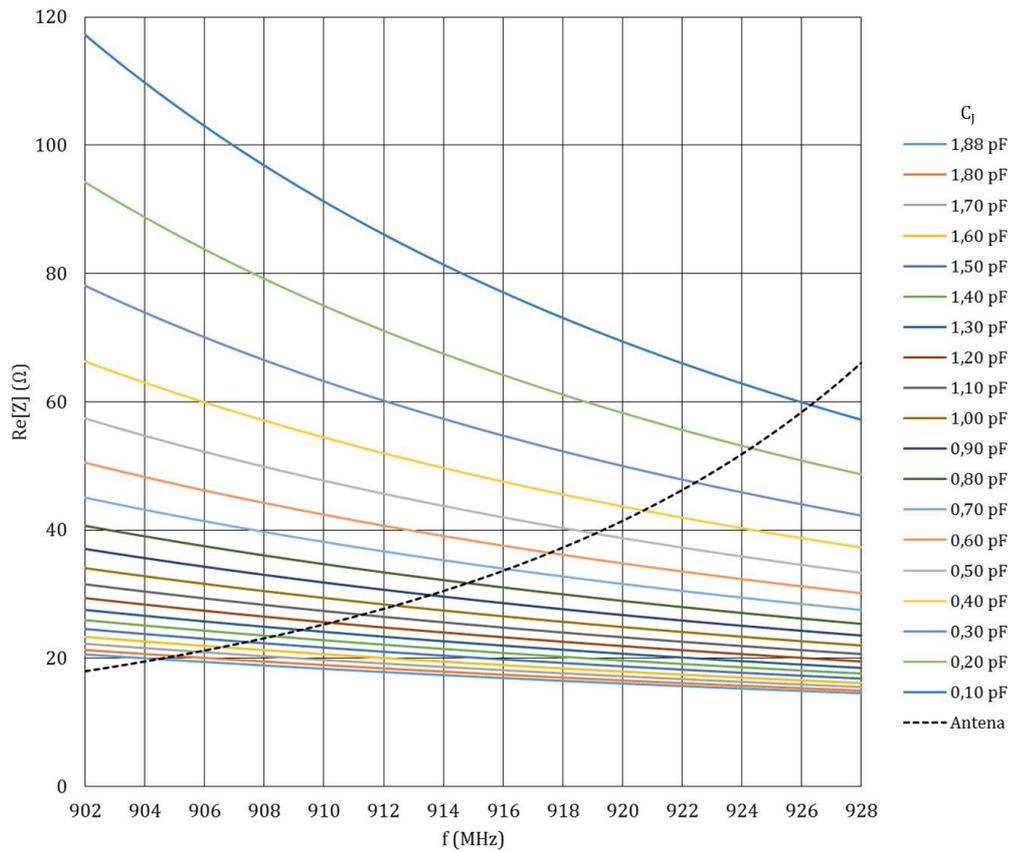


Figura 3.18 – Parte real da impedância Z_L para diferentes valores de C_j .

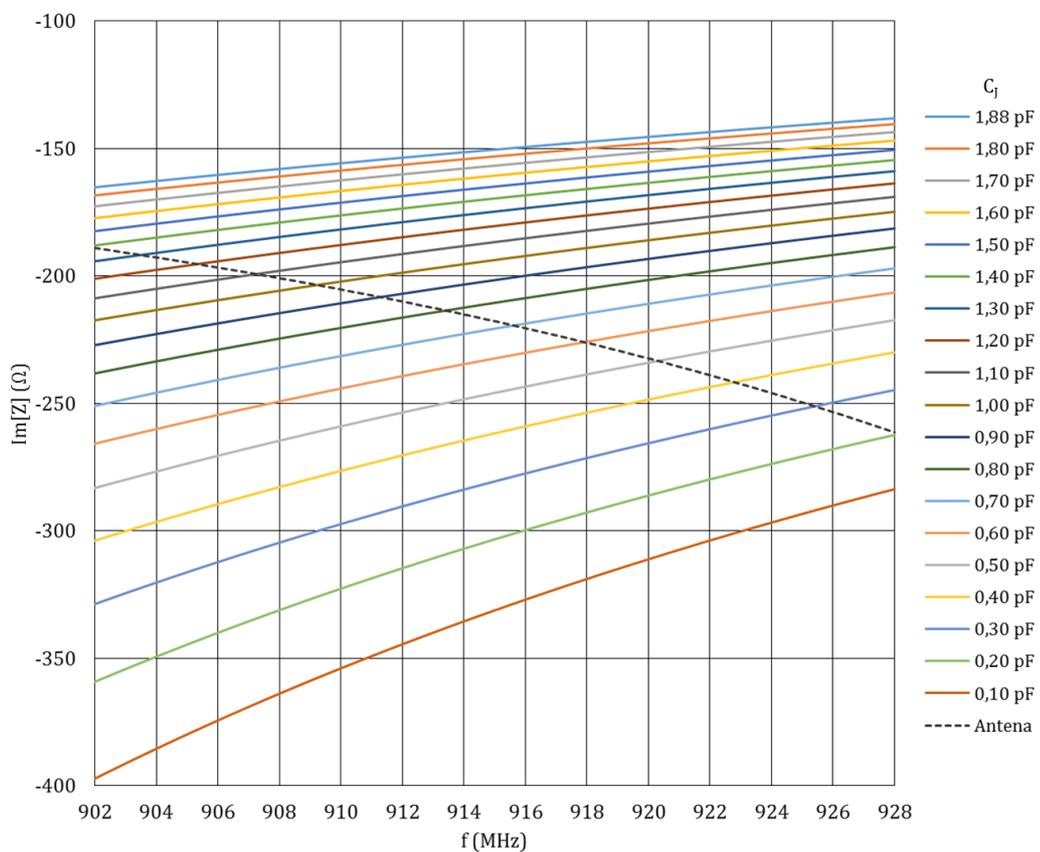


Figura 3.19 – Parte imaginária da impedância Z_L para diferentes valores de C_j .

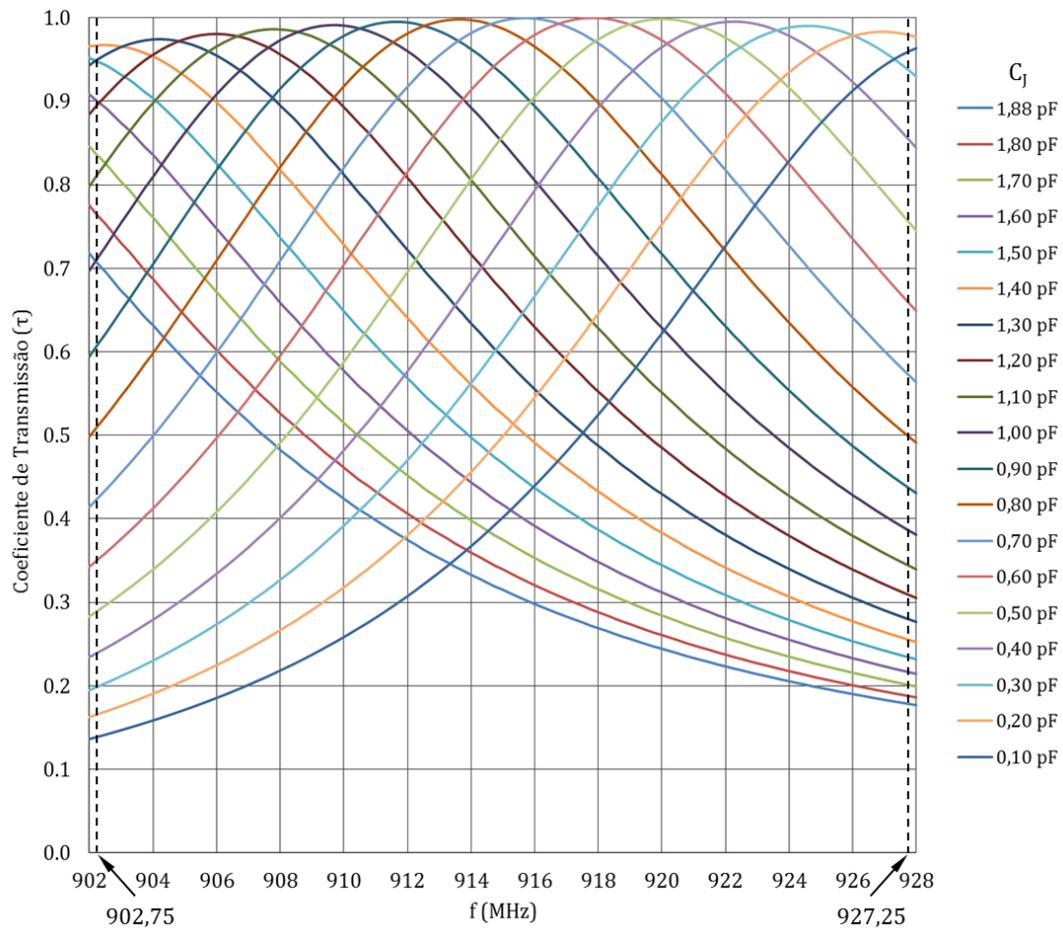


Figura 3.20 – Coeficiente de transmissão de potência para diferentes valores de C_j .

A partir da determinação do coeficiente de transmissão para diferentes valores da capacitância C_j do varactor e do ganho da antena, é possível calcular a distância máxima de detecção da EPSCE por (2.14).

Na Figura 3.21, é mostrada a variação da distância máxima em função da capacitância C_j do varactor, para diferentes valores da potência P_T de saída do leitor. Os demais parâmetros considerados na determinação da distância são indicados na Figura 3.21.

No lado direito do gráfico da Figura 3.21 estão indicadas as distâncias máximas (d_1) para o maior valor de C_j do varactor (igual a 1,88 pF), correspondente a $V_R = V_C = 0$. Acima da distância d_1 , a EPSCE não é detectada pelo sistema quando não há corrente circulando pelo sensor. Ainda na Figura 3.21, são mostradas as distâncias (d_2) para C_j igual a 0,1 pF ($V_R = 8V$), valor mínimo da capacitância do varactor considerada no projeto da EPSCE e para o qual o valor de pico de τ é aproximadamente igual a 0,95, como pode ser observado na Figura 3.20.

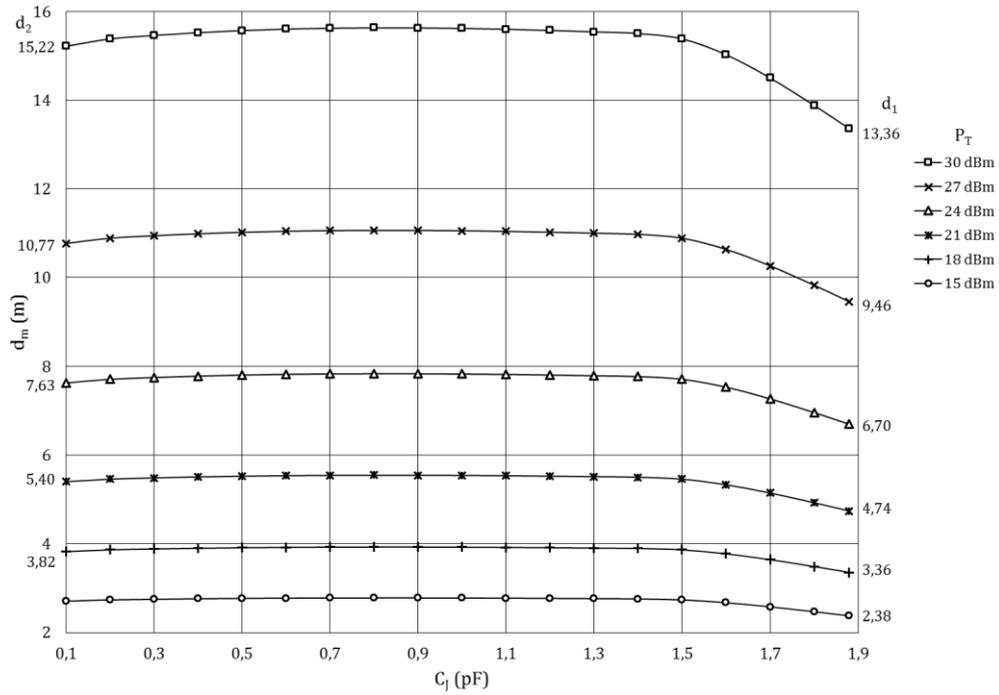


Figura 3.21 – Distância máxima em função da capacitância C_j , para diferentes valores de P_T , com $G_T = 6$ dBi, $p = 1$ e $P_{thE} = -18,5$ dBm.

Na presença de corrente, ou seja, quando há consumo de energia pelo equipamento ao qual a EPSCE está conectada, o valor de C_j diminui e, como pode ser visto na Figura 3.21, a distância máxima aumenta. Dado que C_j pode variar de 1,88 pF a 0,1 pF, a distância entre a antena do leitor e a ESPCE deve ser maior que d_1 para que a etiqueta seja detectada pelo sistema quando existir corrente circulando no sensor.

O efeito da alteração de τ , em virtude da correspondente mudança no valor de C_j , sobre o raio da área de cobertura ($d_{m\acute{a}x}$) do sistema RFID pode ser observado na Figura 3.22, para uma dada potência P_T de saída do leitor. Na figura, a antena do leitor é considerada omnidirecional e o ambiente de propagação é o espaço livre.

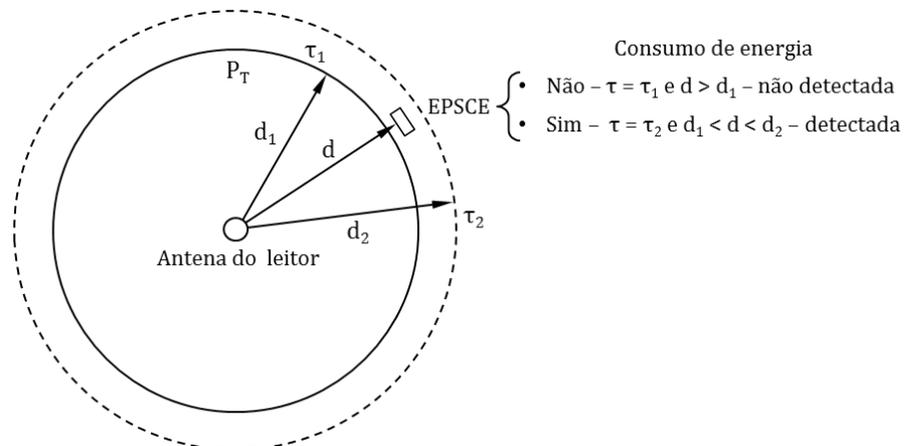


Figura 3.22 – Variação da distância máxima (área de cobertura) com τ .

Ajustes da distância entre a EPSCE e a antena do leitor e também da potência de saída do leitor possibilitam a adequada detecção da etiqueta e, em consequência, do consumo ou não de energia elétrica.

3.3. SISTEMA RFID COM DIVERSAS EPSCEs

Embora não esteja entre os objetivos deste trabalho, um possível processo para a detecção de várias EPSCEs é apresentado a seguir.

Em um sistema RFID com diversas EPSCEs, como o mostrado na Figura 2.6, onde as etiquetas se encontram dispostas em diferentes distâncias da antena do leitor, a detecção individual pode ser realizada através de um processo que consiste na alteração da potência de saída do leitor em saltos com duração predeterminada. Um sistema com um número n de EPSCEs é ilustrado na Figura 3.23.

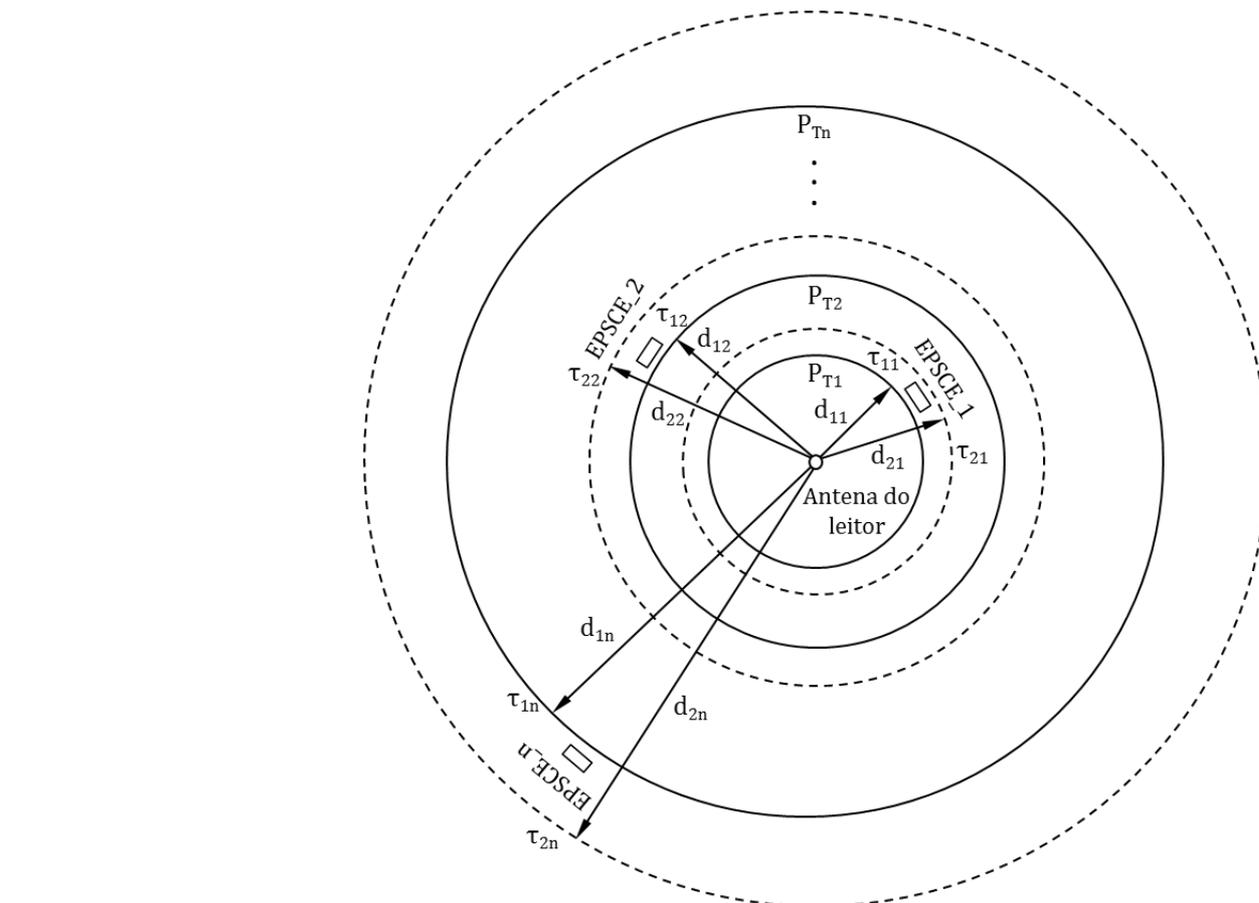


Figura 3.23 – Sistema RFID com várias EPSCEs.

Inicialmente, uma fase denominada de calibração do sistema é realizada. Com o leitor configurado na máxima potência de saída, as EPSCEs, conectadas no plugue do cabo de alimentação de cada um dos equipamentos, são colocadas nas tomadas de energia.

Durante a fase de calibração todos equipamentos encontram-se desligados. A potência de saída do leitor é diminuída de forma contínua ou em pequenos passos (p.ex., da ordem de 0,1 dB) por um atenuador de RF, mostrado no diagrama da Figura 3.24.

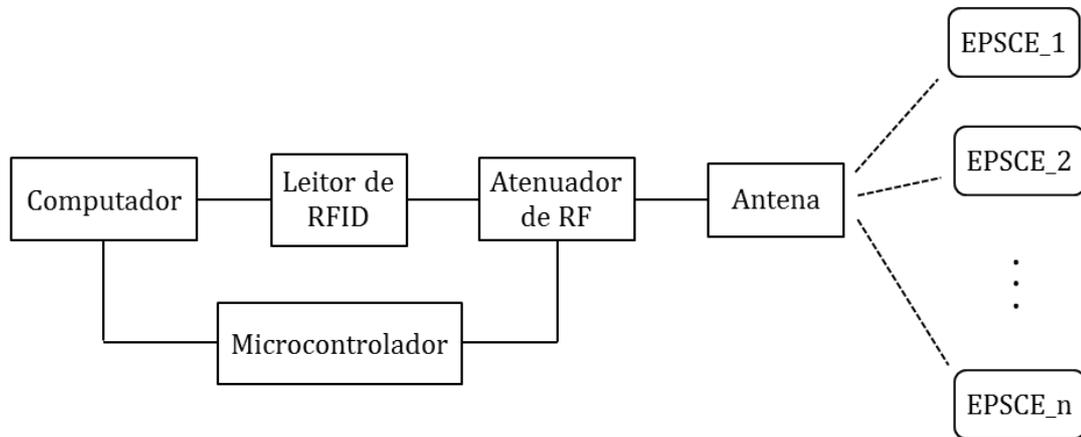


Figura 3.24 – Sistema RFID para a detecção de várias EPSCEs.

Em virtude da diminuição da potência radiada pela antena, uma a uma, as etiquetas deixam de ser detectadas. Para cada EPSCE que deixa de ser identificada, o valor da potência em que a não detecção ocorreu é associado à etiqueta e armazenado na memória do microcontrolador, visto na Figura 3.24. O microcontrolador possui uma interface com o computador ao qual o leitor está conectado e onde as etiquetas são identificadas por meio de um aplicativo de software que controla o leitor e o atenuador de RF.

A partir das potências registradas é possível estabelecer um ciclo de leitura das EPSCEs, mostrado na Figura 3.25, que é enviado continuamente para o atenuador de RF pelo microcontrolador durante a fase de operação do sistema. As etiquetas são detectadas através da variação de τ , que aumenta a distância de leitura de d_1 para d_2 com a existência de consumo de energia elétrica. O intervalo de tempo Δt no qual a potência fica constante em um determinado valor deve ser suficiente para que, no mínimo, uma leitura seja realizada.

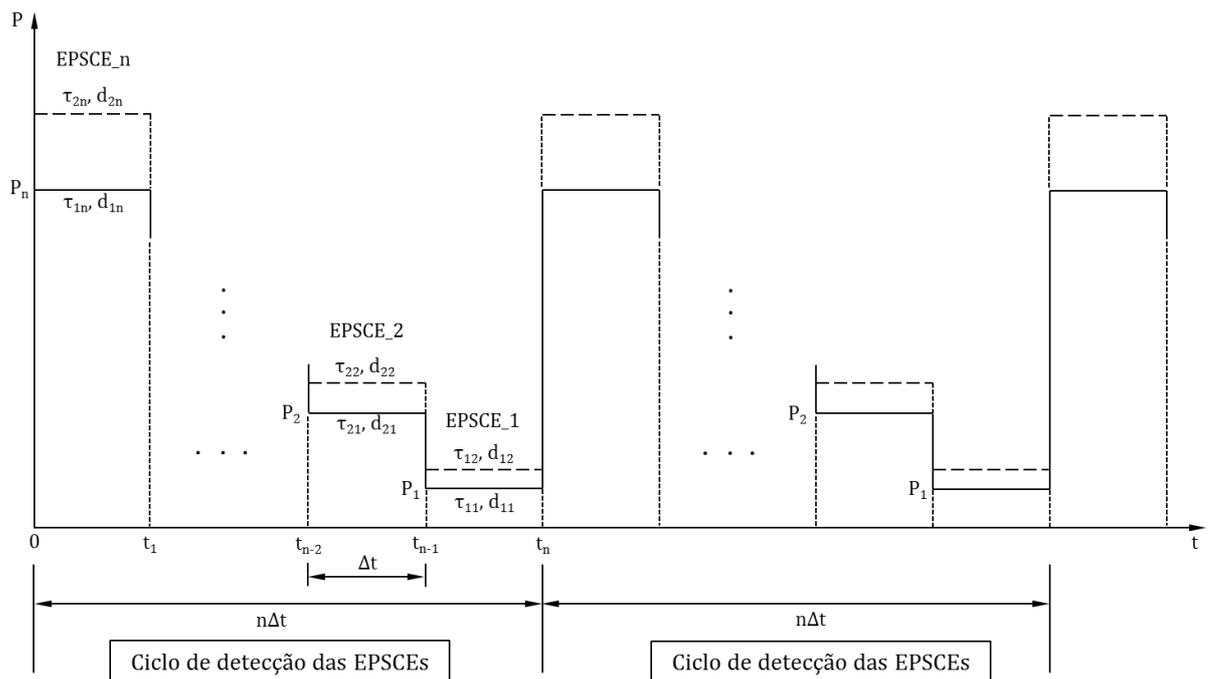


Figura 3.25 – Ciclo de detecção das EPSCEs.

3.4. PROJETO MECÂNICO DA EPSCE

Uma das importantes etapas do projeto da EPSCE consistiu no desenvolvimento do encapsulamento mecânico da etiqueta. O objetivo principal do projeto mecânico foi realizar a integração do sensor da etiqueta com o plugue do cabo de energia elétrica de um equipamento de forma simples, compacta e robusta, que permita a amostragem da corrente de alimentação.

Com a utilização de um sensor semelhante (com cor diferente) ao apresentado na Figura 3.1, o encapsulamento da EPSCE foi desenvolvido na forma de um conector de passagem, conforme pode ser visto na Figura 3.26. As dimensões do encapsulamento foram baseadas na NBR 14136 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) [68].

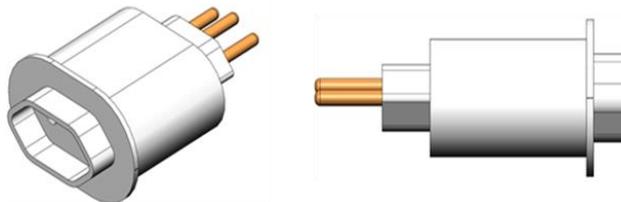


Figura 3.26 – Encapsulamento da EPSCE.

De acordo com o objetivo do projeto, a PCI foi acomodada no interior do conector que forma que o furo do sensor fosse atravessado por um pino de fase, como é mostrado nas figuras 3.27 e 3.28. Na Figura 3.29, é apresentada uma das peças do conector com a

PCI e o sensor de corrente acoplado ao pino de fase.

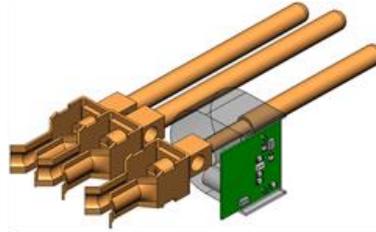


Figura 3.27 – Sensor de corrente atravessado por um pino de fase da tensão alternada.

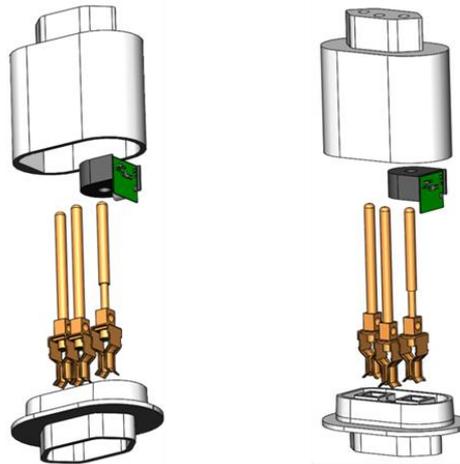


Figura 3.28 – Detalhes da acomodação da PCI no encapsulamento da EPSCE.



Figura 3.29 – Parte do encapsulamento da EPSCE com o sensor na PCI acoplado ao pino de fase.

Após o projeto do encapsulamento, alguns protótipos foram confeccionados em uma impressora 3D (Tridimensional) para a realização de testes funcionais, que são apresentados adiante. Um desses protótipos pode ser visto na Figura 3.30.

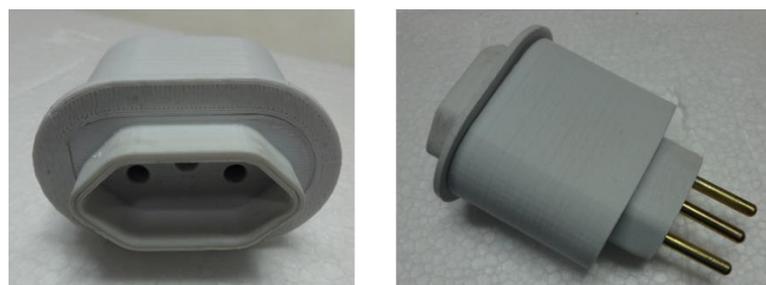


Figura 3.30 – Protótipo da EPSCE.

3.5. POTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS IDENTIFICADOS PELA EPSCE

Os valores mínimo e máximo da tensão V_C observados na Figura 3.5, para a resistência de amostragem $R_A = 1 \text{ k}\Omega$, levam a duas importantes questões que foram consideradas no desenvolvimento da EPSCE. A primeira refere-se à identificação do consumo de cargas de baixa potência, em virtude do pequeno valor de pico de V_S , insuficiente para superar a mínima tensão necessária (V_{Fmin}) [57] para a retificação pelo diodo Schottky. A segunda é referente aos valores de V_C para cargas de alta potência, que ultrapassam a tensão reversa de 8 V para os quais C_j é menor que 0,1 pF, conforme descrito anteriormente.

Para solucionar ambas as questões, duas versões da EPSCE foram desenvolvidas e que diferem apenas no valor da resistência R_A . Simulações e testes foram realizados para definir os valores de R_A e as faixas de operação de cada versão, em termos da potência dos equipamentos a serem identificados. Os resultados das simulações e das medidas são apresentados na Figura 3.31, bem como os valores da resistência R_A considerados e da máxima tensão reversa do varactor, que não pode ser ultrapassada.

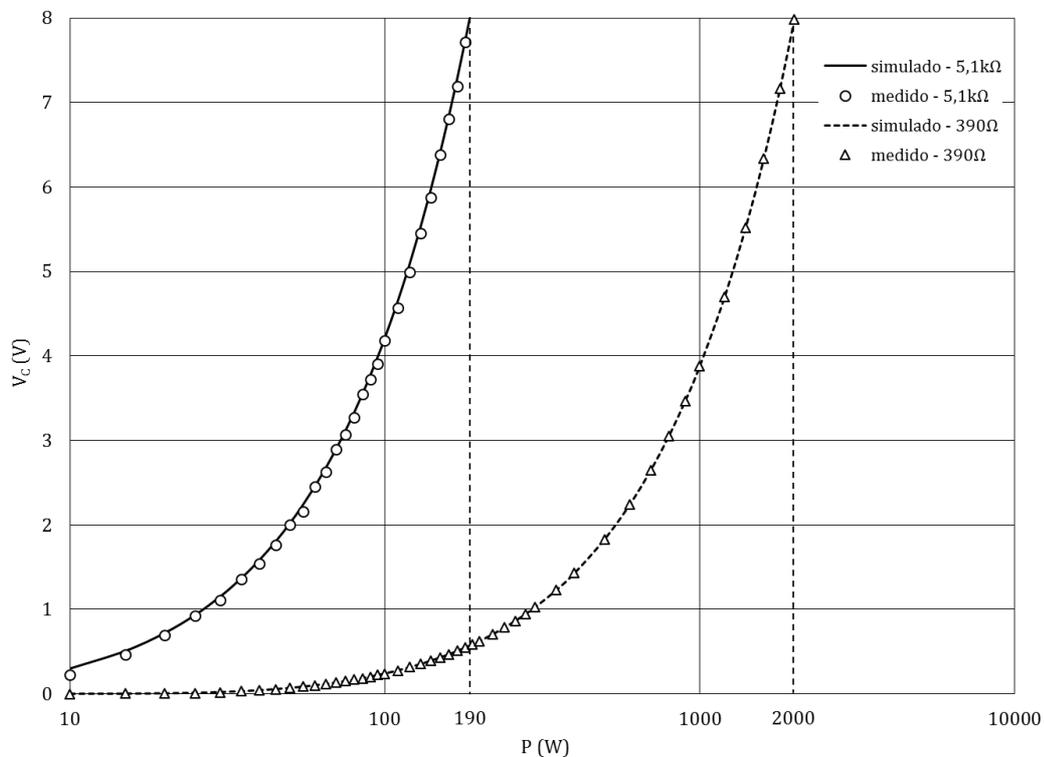


Figura 3.31 – Variação da tensão V_C com a potência da carga para diferentes valores de R_A .

Observa-se na Figura 3.31 que, para cargas com potência acima de 190 W, a tensão V_C é maior que 8 V, quando $R_A = 5,1 \text{ k}\Omega$. Contudo, para cargas com potência inferior a 190

W , V_C é sempre maior que o valor correspondente para $R_A = 390 \Omega$, que é melhor para a detecção de cargas de baixas potência.

Assim, para uma EPSCE_BP (EPSCE para cargas de baixa potência – $R_A = 5,1 \text{ k}\Omega$) a faixa de operação foi definida para identificação de cargas com potência entre 10 W e 190 W. Para uma EPSCE_AP (EPSCE para cargas de alta potência – $R_A = 390 \Omega$) a faixa foi escolhida para cargas com potência entre 190 W e 2000 W. No possível desenvolvimento de um produto a partir deste trabalho, as faixas de operação devem especificadas para o uso correto das EPSCEs.

CAPÍTULO 4

TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os testes funcionais e de campo da EPSCE. Em ambos os testes, o objetivo principal é verificar se a etiqueta é detectada pelo sistema, em virtude da existência de consumo de energia elétrica por um dado equipamento (carga). Os resultados são indicados de acordo com uma das duas possíveis condições encontradas nos testes: (a) etiqueta detectada ou (b) etiqueta não detectada. Na Seção 4.1, mostram-se os resultados dos testes com lâmpadas incandescentes utilizadas com carga para verificar o funcionamento de uma EPSCE em um sistema RFID. Resultados dos testes de campo com equipamentos eletrodomésticos em um ambiente residencial são apresentados na Seção 4.2.

4.1. TESTES FUNCIONAIS DA EPSCE

Após a construção e montagem da EPSCE, foram realizados testes com o objetivo de verificar o funcionamento da etiqueta em um sistema RFID composto de um leitor controlado por um computador e uma antena. Ambos os componentes do *setup* de teste encontram-se disponíveis no mercado [69-70] e são identificados na Figura 4.1.

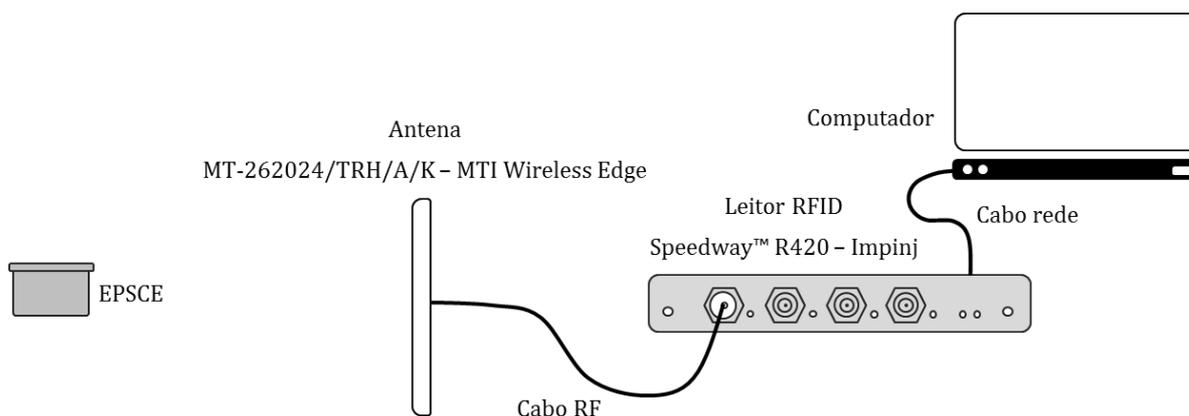


Figura 4.1 – Configuração de teste da EPSCE.

No computador, o ItemTest, um aplicativo de software fornecido pela Impinj, foi utilizado para controlar o leitor e realizar a leitura da EPSCE. O aplicativo permite configurar diversos parâmetros do leitor (p. ex., a potência de saída) e outros relativos ao processo de inventário, no qual as etiquetas são identificadas pelo sistema. Duas telas do

ItemTest podem ser vistas na Figura 4.2. Maiores detalhes do software e das configurações possíveis podem ser encontrados em [71].

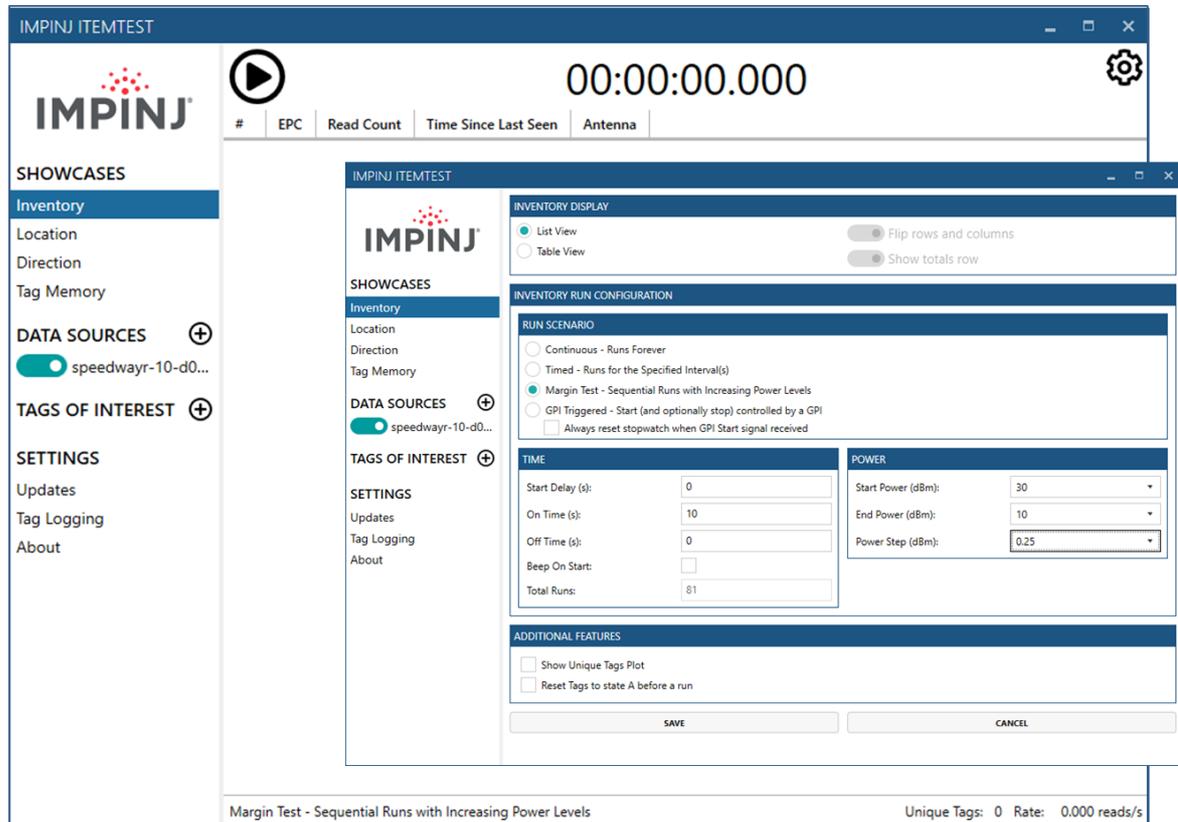


Figura 4.2 – Telas inicial e de configuração do software ItemTest.

Para o teste de funcionamento da EPSCE, lâmpadas incandescentes com potências nominais de 10 W, 25 W, 40 W, 60 W, 100 W, 150 W e 200 W foram utilizadas como carga. Com exceção da lâmpada de 200 W, para a qual o teste foi realizado com uma EPSCE_{AP}, para todas as outras cargas a etiqueta utilizada foi do tipo EPSCE_{BP}.

Para que as EPSCEs pudessem ser identificadas no ItemTest, dois diferentes EPCs foram gravados na memória dos CIs das etiquetas: 0E12-0A85-4033-386A-2B71-0001 para a EPSCE_{BP} e 0E12-0A85-4033-386A-2B71-0002 para a EPSCE_{AP}.

No *setup* da Figura 4.3, a antena foi colocada a uma distância de 2 m da EPSCE sem carga e a potência de saída do leitor foi reduzida pelo ItemTest a partir do valor máximo (30 dBm) em passos de 0,25 dB, até que a etiqueta deixasse de ser identificada pelo sistema. Como pode ser visto na Figura 4.2, a faixa de potência, o passo de redução e o tempo de duração em um dado valor de potência são parâmetros que podem ser configurados no ItemTest para um cenário denominado de Margin Test durante o período de inventário da(s) etiqueta(s).

No teste, o valor de potência em que a EPSCE sem carga deixou de ser identificada pelo sistema foi de 18,25 dBm.



Figura 4.3 – Teste da EPSCE com lâmpadas incandescentes.

Em seguida, as lâmpadas foram inseridas e retiradas do bocal de maneira sequencial, em ordem crescente de potência. Os resultados de detecção obtidos são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados do teste funcional da EPSCE

| Potência da lâmpada | EPSCE | |
|---------------------|-------|--------------|
| | Tipo | Identificada |
| 10 W | BP | Sim |
| 25 W | BP | Sim |
| 40 W | BP | Sim |
| 60 W | BP | Sim |
| 100 W | BP | Sim |
| 150 W | BP | Sim |
| 200 W | AP | Sim |

Como pode ser observado na Tabela 4.1, a etiqueta foi detectada pelo sistema para todas as cargas com diferentes potências, o que comprova o funcionamento adequado da EPSCE na identificação do consumo de energia elétrica.

4.2. TESTES DE CAMPO

Com o objetivo de avaliar o desempenho da etiqueta em um ambiente de aplicação, oito protótipos de EPSCEs foram desenvolvidos e testes de campo foram conduzidos com o objetivo de demonstrar o funcionamento da etiqueta em um ambiente residencial. Os protótipos foram conectados nos cabos de alimentação de diferentes equipamentos elétricos e eletrônicos, usualmente encontrados em residências.

Na Figura 4.4, são mostrados os protótipos, identificados como EPSCE_X, associados com o eletrodoméstico cujo consumo de energia foi monitorado. Para cada etiqueta, foi atribuído um EPC de 96 *bits* e gravado na memória do CI. Os eletrodomésticos utilizados nos testes, suas potências nominais, as etiquetas, o tipo e os respectivos códigos EPC são mostrados na Tabela 4.2.



Figura 4.4 – ESPCEs para uso nos testes de campo.

Tabela 4.2 – Eletrodomésticos e EPSCEs associadas

| EPSCE | | Equipamento | Potência (W) | Código EPC |
|-------|---------|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| AP | EPSCE_1 | Ferro elétrico | 1.000 | E200493F382137F126BE0001 |
| BP | EPSCE_2 | Geladeira | 300 | E200493F382137F126BE0002 |
| BP | EPSCE_3 | Liquidificador | 200 | E200493F382137F126BE0003 |
| AP | EPSCE_4 | Forno de micro-ondas | 2.000 | E200493F382137F126BE0004 |
| AP | EPSCE_5 | Forno elétrico | 1.500 | E200493F382137F126BE0005 |
| AP | EPSCE_6 | Máquina de lavar roupas | 1.000 | E200493F382137F126BE0006 |
| AP | EPSCE_7 | Computador (<i>Notebook</i>) | 500 | E200493F382137F126BE0007 |
| BP | EPSCE_8 | Televisor | 200 | E200493F382137F126BE0008 |

Os testes foram realizados para equipamentos colocados em vários ambientes da residência. A localização das EPSCEs associadas a cada equipamento e da antena do leitor foi determinada a partir da origem na Figura 4.5.

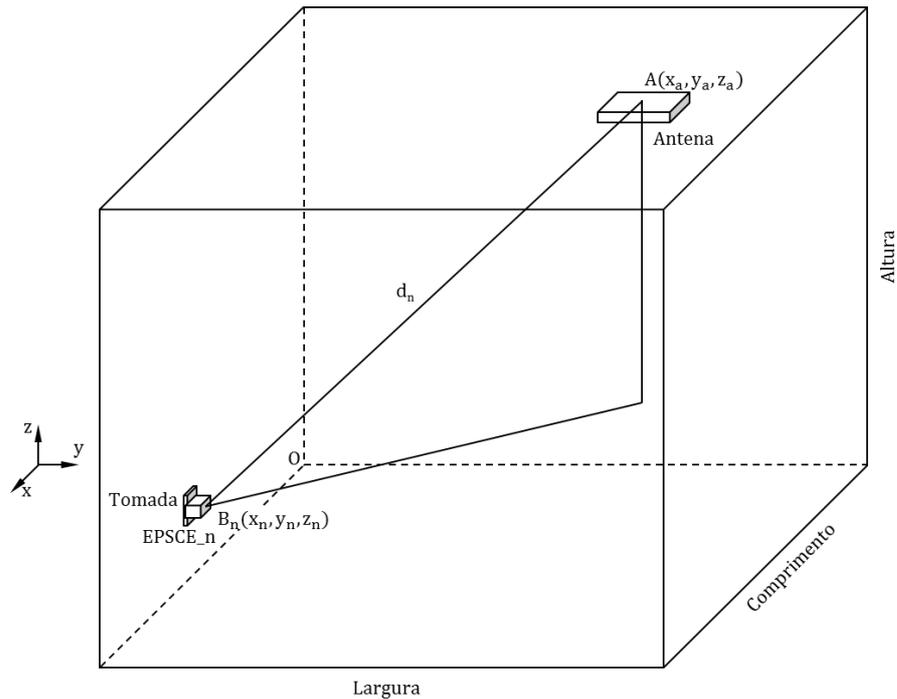


Figura 4.5 – Localização da antena do leitor e da EPSCE em um ambiente de teste.

Na Figura 4.6, são mostrados a vista de cima da cozinha, da copa e da área de serviço e o local onde os equipamentos monitorados se encontram. O comprimento, a largura e a altura de cada ambiente são apresentados na figura. A localização das EPSCEs e da antena do leitor é mostrada na Tabela 4.3. A distância d_m entre a antena e cada etiqueta também é apresentada na tabela.

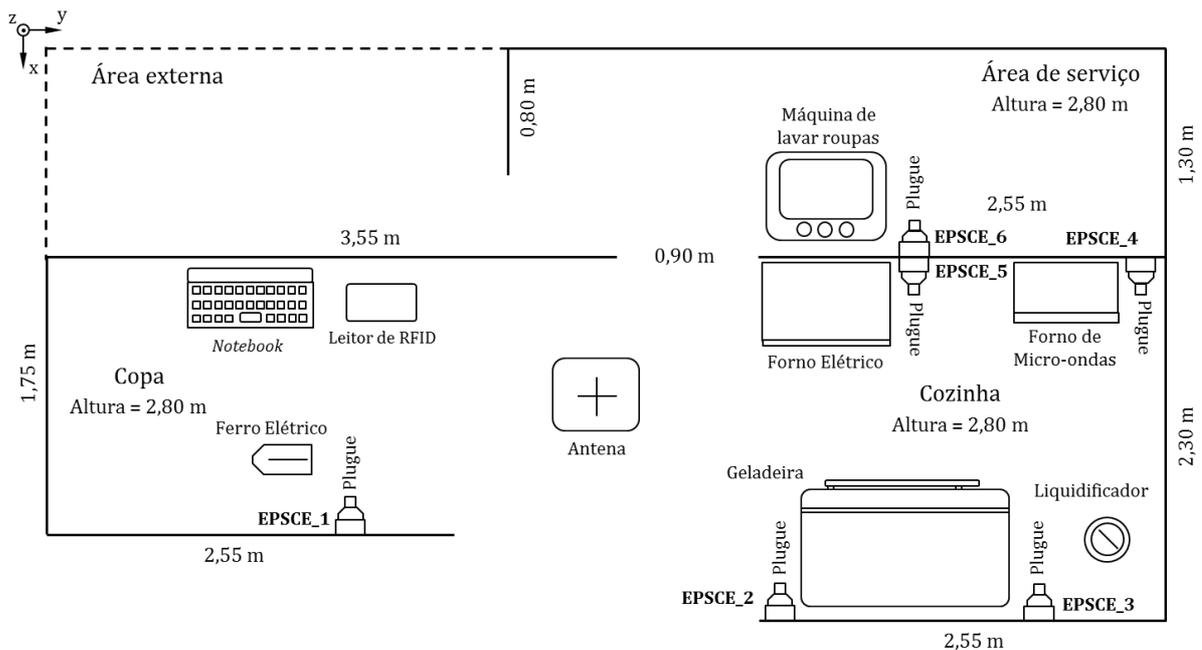


Figura 4.6 – Vista de cima da cozinha, copa e área de serviço.

Tabela 4.3 – Localização da antena e das EPSCEs na cozinha, copa e área de serviço

| | Ponto | x(m) | y(m) | z(m) | d_n (m) |
|----------|----------------|------|------|------|-----------|
| Antena | A | 1,80 | 3,50 | 2,70 | |
| EPSC_E_1 | B ₁ | 3,60 | 5,50 | 0,45 | 3,51 |
| EPSC_E_2 | B ₂ | 3,60 | 1,65 | 0,45 | 3,42 |
| EPSC_E_3 | B ₃ | 1,30 | 5,75 | 1,05 | 2,83 |
| EPSC_E_4 | B ₄ | 1,30 | 6,75 | 1,60 | 3,47 |
| EPSC_E_5 | B ₅ | 1,30 | 5,75 | 1,05 | 2,83 |
| EPSC_E_6 | B ₆ | 3,45 | 6,45 | 1,05 | 3,76 |

Na Figura 4.7, é mostrada a vista de cima da sala onde se encontram o televisor, o computador e as suas respectivas EPSCEs. As principais dimensões da sala também são indicadas na figura. As coordenadas dos pontos de localização das etiquetas e da antena do leitor em relação à origem são apresentadas na Tabela 4.4 da mesma forma que a distância d_m entre a antena e cada EPSCe.

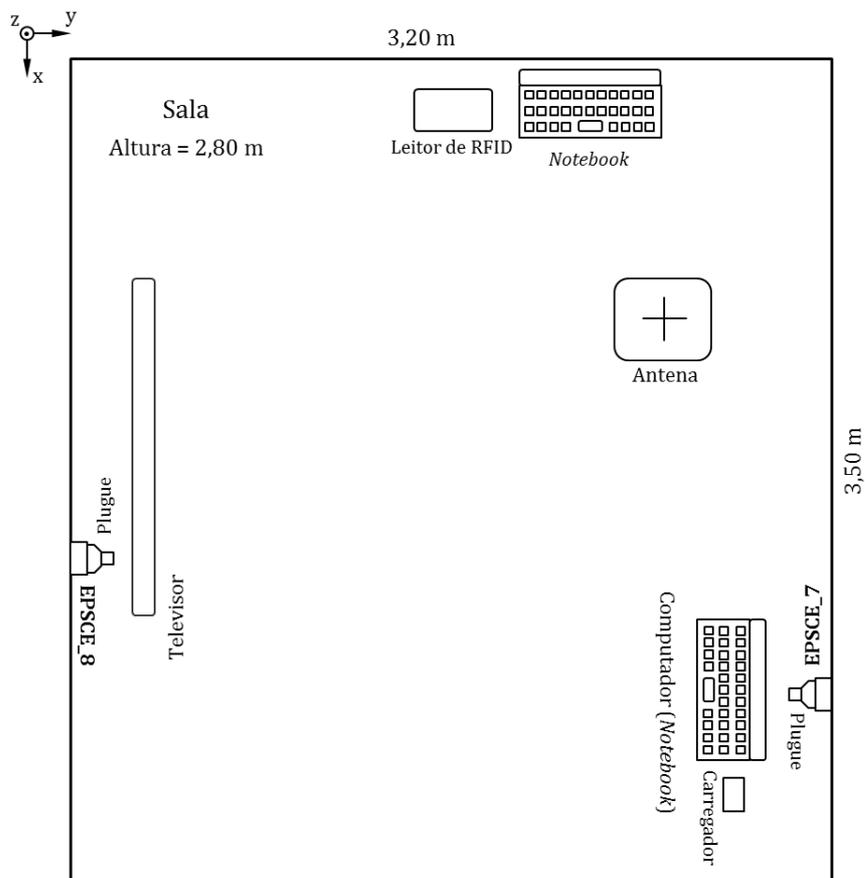


Figura 4.7 – Vista de cima da sala.

Tabela 4.4 – Localização da antena e das EPSCEs na sala

| | Ponto | x(m) | y(m) | z(m) | d_n (m) |
|---------|----------------|------|------|------|-----------|
| Antena | A | 1,10 | 2,50 | 2,70 | |
| EPSCE_7 | B ₇ | 3,20 | 2,70 | 0,45 | 2,85 |
| EPSCE_8 | B ₈ | 2,10 | 0,00 | 0,45 | 3,51 |

Conforme descrito no Item 3.2 do Capítulo 3, com todos os equipamentos do ambiente desligados, a calibração de potência foi executada e os respectivos valores para cada EPSCE registrados. A partir do valor máximo, o ajuste da potência de saída do leitor foi realizado em passos de 0,25 dB, de forma automática, através do ItemTest, até que cada etiqueta deixasse de ser detectada pelo sistema. Na Tabela 4.5, são apresentados os níveis mínimos de potência relativos às etiquetas nos ambientes onde os testes foram realizados.

Tabela 4.5 – Potência de saída do leitor para as EPSCEs não detectadas

| Etiqueta | Potência de saída (dBm) EPSCE não detectada |
|----------|--|
| EPSCE_1 | 23,25 |
| EPSCE_2 | 23,00 |
| EPSCE_3 | 21,50 |
| EPSCE_4 | 23,25 |
| EPSCE_5 | 21,25 |
| EPSCE_6 | 24,25 |
| EPSCE_7 | 21,25 |
| EPSCE_8 | 23,75 |

Com as potências obtidas na calibração, cada equipamento foi ligado e desligado em sequência a fim de detectar o consumo de energia. Quarenta rotinas de teste foram realizadas em diferentes dias e períodos do dia. Durante uma rotina, o intervalo de tempo que cada equipamento permaneceu ligado foi constante e igual a 20 minutos.

Nos testes, somente a EPSCE relativa ao equipamento cujo consumo era objeto de identificação foi monitorada no ItemTest e todas as demais foram desconsideradas, dado

que o software de controle e o sistema da Figura 3.24 não foram implementados por não serem o objetivo deste trabalho.

Os resultados dos testes são apresentados nas tabelas 4.6 e 4.7 para os ambientes das figuras 4.6 e 4.7, respectivamente. Nas tabelas, o número de leituras é o valor médio das medidas obtidas em cada rotina de teste.

Tabela 4.6 – Detecção das EPSCEs – Equipamentos ligados na cozinha, copa e área de serviço

| Eletrrodoméstico | Etiqueta | EPSCE detectada quando o equipamento foi ligado | Número médio de leituras em um período de 20 min |
|-------------------------|----------|---|--|
| Ferro elétrico | EPSCE_1 | Sim | 63.229 |
| Geladeira | EPSCE_2 | Sim | 44.418 |
| Liquidificador | EPSCE_3 | Sim | 54.021 |
| Forno de micro-ondas | EPSCE_4 | Sim | 46.824 |
| Forno elétrico | EPSCE_5 | Sim | 51.626 |
| Máquina de lavar roupas | EPSCE_6 | Sim | 30.425 |

Tabela 4.7 – Detecção das EPSCEs – Equipamentos ligados na sala

| Eletrrodoméstico | Etiqueta | EPSCE detectada quando o equipamento foi ligado | Número médio de leituras em um período de 20 min |
|--------------------------------|----------|---|--|
| Computador (<i>Notebook</i>) | EPSCE_7 | Sim | 59.005 |
| Televisor | EPSCE_8 | Sim | 43.222 |

Dos resultados das tabelas 4.6 e 4.7, observa-se que a EPSCE_6, associada à máquina de lavar de roupas, foi a que apresentou o menor número médio de leituras, em virtude de estar a uma distância maior da antena, além de não ter visada com a mesma, estando encoberta por obstáculos (p. ex., a parede que divide a cozinha e a área de serviço). Contudo, como todas as outras etiquetas, a EPSCE_6 foi detectada pelo sistema, o que demonstra a eficiência da solução apresentada neste trabalho para a identificação e o controle do consumo individual de energia elétrica de equipamentos eletroeletrônicos.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais deste trabalho. Conclusão, na seção 4.1, e passos em direção a trabalhos futuros são descritos na seção 4.2, com vista a possibilitar a integração da ESPCE em um sistema completo de monitoração do consumo de energia elétrica de equipamentos em ambientes domésticos e/ou industriais.

5.1. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma etiqueta passiva de RFID em UHF com um sensor de corrente para identificação do consumo de energia elétrica por equipamentos elétricos e eletroeletrônicos. Através da amostragem da corrente que flui no pino do plugue do cabo de alimentação de um equipamento eletroeletrônico é possível modificar a condição de identificação da etiqueta dentro da área de cobertura de um leitor. A identificação da etiqueta pelo sistema possibilita a monitoração individualizada da energia consumida por um dado equipamento em ambientes domésticos ou industriais.

O uso da EPSCE traz diversas possibilidades futuras de automação. Considerando a evolução crescente dos sistemas de automação doméstica e industrial, as EPSCEs podem permitir um controle preciso sobre quais aparelhos são permitidos, por exemplo, em cada tomada. Podem oferecer maior segurança quanto ao fornecimento de energia baseado na tensão de operação de um dado aparelho, analisar e alertar casos de mau funcionamento. Tendo como base um perfil de consumo fornecido pelo fabricante de um equipamento, o uso de EPSCEs podem contribuir para a gestão mais adequada dos gastos com energia elétrica.

A EPSCE apresentada neste trabalho tem seu funcionamento baseado na alteração da transferência de potência de RF entre a antena e o circuito integrado da etiqueta.

Os protótipos avaliados nos testes demonstraram a viabilidade técnica da EPSCE, comprovando a inovação introduzida pelo conceito de monitoração de energia elétrica por meio de etiquetas passivas de RFID. Além disso, em termos mercadológicos, a solução é viável em virtude do baixo custo envolvido, em especial, para produção em larga escala.

5.2. PRÓXIMOS PASSOS E TRABALHOS FUTUROS

Algumas possíveis evoluções em direção à integração da EPSCE em um sistema de monitoração do consumo de energia elétrica por RFID em UHF podem ser apontadas. Uma delas é o desenvolvimento de aplicativos de software que permitam a consulta a um banco de dados de equipamentos, onde estão armazenadas as suas principais características. Entre várias alternativas de desenvolvimento, aplicativos que coletam dados em tempo real do consumo em kWh, podem contribuir para a minimização de custos e evitar desperdícios de energia elétrica.

Outra evolução deste trabalho é a implementação de leitores pequenos, de muito baixo custo e capacidade de leitura (p. ex., até cinco etiquetas) que podem ser incorporados às tomadas de energia elétrica para leitura das EPSCEs em campo próximo. A informação das etiquetas detectadas poderiam ser transferidas para um computador central por meio da própria rede de energia com o uso de dispositivos PLC (*Power Line Communications*).

Mais uma possível evolução é o desenvolvimento de pequenos repetidores do sinal de RF transmitido pelos leitores, que poderiam ser instalados no interior das tomadas de energia elétrica. Isto pode aumentar a distância de identificação das EPSCEs permitindo a redução da quantidade de leitores de RFID em um dado ambiente doméstico ou industrial.

REFERÊNCIAS

- [1] DOBKIN, D. M. RF in RFID: UHF RFID in Practice. Second ed. New York: Newnes, 2012.
- [2] CATARINUCCI, L.; COLELLA, R.; TARRICONE, L. A cost-effective UHF RFID tag for transmission of generic sensor data in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 57, n. 5, p. 1291–1296, 2009.
- [3] GU, C.; ZHANG, H.; CHEN, Q. Design and implementation of energy data collection system using Wireless Fidelity (WiFi) module and current transformer. *Conference Proceedings – 2014 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2014*, p. 133–137, 2014.
- [4] LI, L.; HU, X.; ZHANG, W. Design of an ARM-based power meter having WIFI wireless communication module. *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, p. 403–407, 2009.
- [5] ALAHAKOON, D.; YU, X. Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 12, n. 1, p. 425–436, 2016.
- [6] ALI, A. *et al.* Implementation of Automatic Meter Reading (AMR) using radio frequency (RF) module. *PECon 2012 – 2012 IEEE International Conference on Power and Energy*, December, p. 876–879, 2012.
- [7] MURALIDHARA, S.; HEGDE, N.; PM, R. An internet of things-based smart energy meter for monitoring device-level consumption of energy. *Computers and Electrical Engineering*, v. 87, 2020.
- [8] GERSCHENFELD, N.; KRIKORIAN, R.; COHEN, D. The Internet of Things. *Scientific American* – 2004, v. 291, n. 4, p. 76–81, 2004.

- [9] FAN, W. *et al.* The Internet of data: A new idea to extend the IOT in the digital world. *Frontiers of Computer Science in China*, v. 6, n. 6, p. 660–667, 2012.
- [10] VAN KRANENBURG, R.; BASSI, A. IoT Challenges. *Communications in Mobile Computing*, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2012.
- [11] MA, H. D. Internet of things: Objectives and scientific challenges. *Journal of Computer Science and Technology*, v. 26, n. 6, p. 919–924, 2011.
- [12] THAKARE, S. *et al.* Implementation of an energy monitoring and control device based on IoT. 2016 IEEE Annual India Conference, INDICON 2016, 2017.
- [13] DUROC, Y.; KADDOUR, D. RFID potential impacts and future evolution for green projects. *Energy Procedia*, v. 18, p. 91–98, 2012.
- [14] MARROCCO, G. Pervasive Electromagnetics: Sensing Paradigms by Passive RFID Technology. *IEEE Wireless Communications*, December, p. 10–17, 2010.
- [15] LÓPEZ, T. S. RFID and sensor integration standards: State and future prospects. *Computer Standards and Interfaces*, v. 33, n. 3, p. 207–213, 2011.
- [16] ROY, S. *et al.* RFID: From supply chains to sensor nets. *Proceedings of the IEEE*, v. 98, n. 9, p. 1583–1592, 2010.
- [17] FINKENZELLER, K. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*. John Wiley & Sons, 2010.
- [18] COSTA, F. *et al.* A Review of RFID Sensors, the New Frontier of Internet of Things. *Sensors*, v. 21, n. 9, 2021.
- [19] LOUZIR, A.; KUMAR, R.; LE NAOUR, J. Y. RFID based solution for the sensing of home electrical devices activity. *ISAP 2016 – International Symposium on Antennas and Propagation*, p. 1002–1003, 2017.

[20] KUMAR, R.; LOUZIR, A.; LE NAOUR, J. Y. RFID helix antenna on power cord for the sensing of home electrical devices activity. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017, p. 2554–2558, 2017.

[21] KUMAR, R.; LOUZIR, A.; NAOUR, J.-Y. LE. RFID tag coupled with a magnetic sensor for wireless sensing of home electrical devices. European Microwave Conference (EuMC), n. Sep. 23-27, p. 981–984, 2018.

[22] LOUZIR, A.; NAOUR, J.-Y. LE; ROBERT, J.-L. Electrical activity sensor device for detecting electrical activity and electrical activity monitoring apparatus, EU Patent 2916464, 2015.

[23] ULLAH, I. *et al.* RFID AC Current Sensing Technique. IEEE Sensors Journal, v. 20, n. 4, p. 2197–2204, 2020.

[24] ULLAH, I. *et al.* Tag Design for RFID AC Current Sensing System. 14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2020, p. 1–5, 2020.

[25] MAGNELAB. SCT-125w-100 by Magnelab. Disponível em: <www.magnelab.com/products/wireless-accurrentsensor-system-sct-125w>. Acesso em: 10 dez. 2021.

[26] NCD. IoT Long Range Wireless ac Current Monitor. Disponível em: <store.ncd.io/product/wireless-accurrentmonitor>. Acesso em: 10 dez. 2021.

[27] MONNIT. Alta Wireless ac Current Meter-20 A-AA Battery Powered. Disponível em: <www.monnit.com/Product/MNS2-9-W2-CM-020>. Acesso em: 20 jan. 2022.

[28] PRESSAC. Current Sensor: One Channel. Disponível em: <www.pressac.com/current-monitoring-sensors>. Acesso em: 12 jan. 2022.

[29] KEMMANN, H.; SEIFERT, R. Steckeraufnahme einer Steckdosenabdeckung (in German), EU Patent 2369693, 2011.

- [30] HAN, J. S. *et al.* Electrical Outlet for Automatically Sensing Electrical Device, System for Managing Energy Using the Electrical Outlet, and Method Thereof, US Patent 2013/0154808 A1, 2013.
- [31] JIA, X. *et al.* RFID Technology and Its Applications in Internet of Thing (IoT), 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), p. 1282-1285, 2012.
- [32] ROSELLI, L. *et al.* Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the Internet of Things (IoT) paradigm: RFID, Green Electronics, WPT and Energy Harvesting, IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), p. 1-3, 2015.
- [33] SOLIC, P. *et al.* Gen2 RFID as IoT Enabler: Characterization and Performance Improvement. IEEE Wireless Communications, v. 24, n. 3, p. 33-39, 2017.
- [34] CUI, L. *et al.* Radio frequency identification and sensing techniques and their applications – A review of the state-of-the-art. Sensors (Switzerland), v. 19, n. 18, 2019.
- [35] COLELLA, R. *et al.* Design of UHF RFID Sensor-Tags for the Biomechanical Analysis of Human Body Movements. IEEE Sensors Journal, v. 21, n. 13, p. 14090–14098, 2021.
- [36] BHATTACHARYYA, R.; FLOERKEMEIER, C.; SARMA, S. RFID tag antenna based sensing: Does your beverage glass need a refill? RFID 2010: International IEEE Conference on RFID, p. 126–133, 2010.
- [37] OMER, M. *et al.* Passive UHF RFID Tag as a Sensor for Crack Depths. IEEE Sensors Journal, v. 18, n. 23, p. 9867–9873, 2018.
- [38] GAO, J. Antenna-Based Passive UHF RFID Sensor Tags - Design and Application. 2013. 102 f. Mid Sweden University. 2013.

- [39] GROSINGER, J.; BOSCH, W. A passive RFID sensor tag antenna transducer. 8th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2014, EuCAP, p. 3638–3639, 2014.
- [40] KALANSURIYA, P.; BHATTACHARYYA, R.; SARMA, S. RFID tag antenna-based sensing for pervasive surface crack detection. *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 5, p. 1564–1570, 2013.
- [41] CATARINUCCI, L.; COLELLA, R.; TARRICONE, L. Enhanced UHF RFID sensor-tag. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 23, n. 1, p. 49–51, 2013.
- [42] OCCHIUZZI, C.; MARROCCO, G. The RFID technology for neuro-sciences: Feasibility of Limbs' monitoring in sleep diseases. *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, v. 14, n. 1, p. 37–43, 2010.
- [43] BARBIN, M. V. Etiqueta de RFID em UHF para Objetos Metálicos, Dissertação de Mestrado, FEEC, Unicamp. 2015.
- [44] MENG, Z.; LI, Z. RFID Tag as a Sensor - A Review on the Innovative Designs and Applications. *Measurement Science Review*, v. 16, n. 6, p. 305–315, 2016.
- [45] RUHANEN, A. *et al.* Sensor-Enabled RFID Tag Handbook. January, p. 47, 2008.
- [46] GS1. EPC TM Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Specification for RFID Air Interface. p. 1–152, 2013.
- [47] NIKITIN, P. V.; RAO, K. V. S. Antennas and propagation in UHF RFID systems. 2008 IEEE International Conference on RFID (Frequency Identification), IEEE RFID 2008, p. 277–288, 2008.
- [48] GOES, A. A.; CARDIERI, P.; YACOUB, M. D. The RFID Propagation Scenario. *Wireless Personal Communications*, v. 92, p. 437–454, 2017.

- [49] STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. Antenna Theory and Design. Second ed., John Wiley & Sons, 1998.
- [50] BALANIS, C. A. Antenna Theory. Fourth ed., John Wiley & Sons, 2016.
- [51] KUROKAWA, K. An Introduction to the Theory of Microwave Circuits, Academic Press, 1969.
- [52] CHE, Y.-C. *et al.*, A Flexible Inductive Coil Tag for Household Two-Wire Current Sensing Applications. 2012 IEEE Sensors Journal, v. 12, n. 6, p. 2129–2134, 2012.
- [53] PENFIELD, P.; RAFUSE, R. P. Varactor Applications, MIT Press, 1962.
- [54] KRAUSS, H. L.; W. BOSTIAN, C.; H. RAAB, F. Solid State Radio Engineering. John Wiley & Sons, 1980.
- [55] GS1. Regulatory status for using RFID in the EPC Gen 2 band (860 to 960 MHz) of the UHF spectrumGs1, 2021. Disponível em:
http://www.gs1.org/docs/epcglobal/UHF_Regulations.pdf
- [56] YHDC. TA12-TA12L Epoxy resin encapsulated precision current transformer Data Sheet, 2019.
- [57] AVAGO TECHNOLOGIES. HSMS-285x Series Surface Mount Zero Bias Schottky Detector Diodes Data Sheet, 2009.
- [58] ORCAD. PSpice Student Version 9.2, 2005.
- [59] SKYWORKS SOLUTIONS. Skyworks SMV123x series Hyperabrupt Junction tuning Varactors Data Sheet, 2018.
- [60] SKYWORKS SOLUTIONS. Application Note Varactor SPICE Models for RF VCO Applications, 2010.
- [61] ALLIEN TECHNOLOGY. Higgs™4 SOT ALC-370-SOT Data Sheet, 2017.

[62] NIKITIN, P. V. *et al.* Sensitivity and impedance measurements of UHF RFID chips. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v. 57, n. 1, p. 1297–1302, 2009.

[63] ZELAND. IE3D EM Software V.10.2, 2004.

[64] IMPINJ. MONZA 4 Tag Chip Data Sheet, 2016.

[65] NXP SEMICONDUCTORS. SLS3S1205_15 UCODE 8/8m Data Sheet, 2021.

[66] VOLAKIS, J.; CHEN, C.-C.; FUJIMOTO, K. Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications, McGraw Hill, 2009.

[67] ANSOFT. Ansoft Designer SV 2.2, 2008.

[68] ABNT. NBR 14136:2012 – Plugues e tomadas para uso doméstico e análogo até 20 A/250 V em corrente alternada – Padronização, ABNT, Set 2012.

[69] IMPINJ. SpeedwayR Installation and Operations Guide – Version 6.4, 2020.

[70] MTI WIRELESS EDGE. MT-262024/TRH/A/K – 902–928 MHz, 7.5 dBic RHCP Reader Antenna Data Sheet, 2015.

[71] IMPINJ. ItemTest User Guide – version 1.12.3.0, 2018.

APÊNDICE

Conforme é mostrado na Figura 2.8, no Capítulo 2, a corrente que circula nos fios do cabo desloca-se em sentidos opostos, gerando, entre os condutores, campos magnéticos na mesma direção e sentido. Dessa forma, o campo magnético total entre o fios é resultado da soma vetorial dos campos individuais gerada por cada um dos condutores.

O sensor é constituído de uma pequena bobina com espiras chatas, isto é, o condutor possui secção transversal retangular, e é atravessada pelo campo magnético total. De acordo com a Lei de Faraday, o fluxo magnético que passa pela bobina dá origem a uma tensão em seus terminais,

$$v_0 = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (\text{A. 1})$$

onde Φ é o fluxo magnético que atravessa a área interna S da bobina com N espiras.

Para um único condutor no cabo e a bobina com uma espira, a configuração reduz-se à apresentada na Figura A.1. A partir dessa configuração, a tensão induzida pode ser determinada e o resultado generalizado para o caso de dois condutores e uma bobina com N espiras.

Na Figura A.1, o condutor é percorrido por uma corrente elétrica i , dada por

$$i(t) = I_0 \cos \omega t \quad (\text{A. 2})$$

onde I_0 é a amplitude, $\omega = 2\pi f$ a frequência angular da corrente e f é a frequência da rede de energia elétrica, igual a 60 Hz, no Brasil.

Pela Lei de Ampère, a corrente i gera um campo magnético ao redor do condutor, cujo módulo do vetor indução magnética B a uma certa distância r (indicados na Figura 3.15) é dado por,

$$B = \frac{\mu i}{2\pi r} \quad (\text{A. 3})$$

onde μ é a permeabilidade magnética do meio. Para o caso dos materiais envolvidos no problema, a permeabilidade pode ser considerada igual à do vácuo, μ_0 .

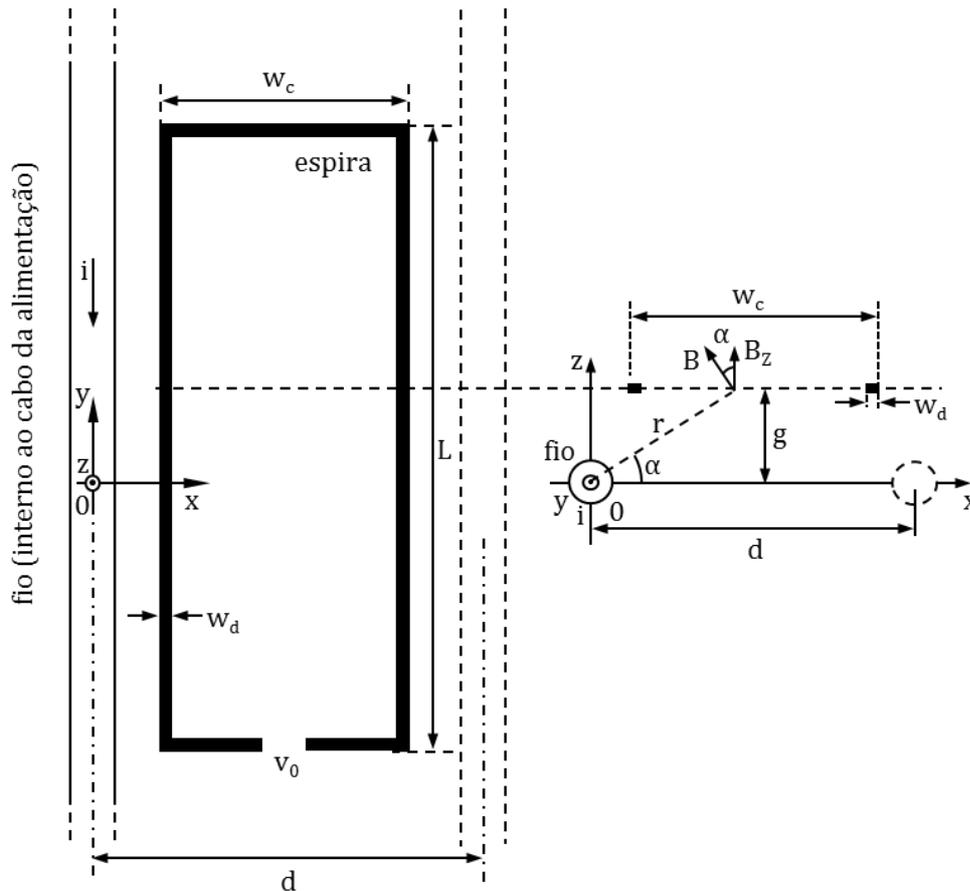


Figura A.1 – Sensor com bobina de uma espira colocado próximo do fio condutor de um cabo de alimentação.

O fluxo magnético que atravessa a bobina pode ser determinado por

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{A.4})$$

onde, $d\vec{S} = dS \hat{a}_n$ é o elemento diferencial de área na direção normal à superfície da espira.

Na Figura A.1, $\hat{a}_n = \hat{a}_z$ e $\vec{B}_z = B_z \hat{a}_z$ é a componente de \vec{B} que contribui para o fluxo que passa pela espira. Dessa forma, (3.14) reduz-se a

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int B_z dS \quad (\text{A.5})$$

Da geometria da Figura A.1, $B_z = B \cos \alpha$ e $\cos \alpha = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}}$. Logo,

$$B_z = B \cos \alpha = B \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}} \quad (\text{A.6})$$

Substituindo (A.2) em (A.3) e o resultado em (A.6), obtém-se

$$B_z = B \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}} = \frac{\mu_0 I_0 \cos \omega t}{2\pi \sqrt{x^2 + g^2}} \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}} = \frac{\mu_0 I_0 \cos \omega t}{2\pi} \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}} \quad (\text{A.7})$$

Em (A.5), dS é dado por

$$dS = (L - 2w_d) dx \quad (\text{A.8})$$

Substituindo (A.8) e (A.7) em (A.4) e considerando os limites de integração a_1 e b_1 , tem-se

$$\Phi = \frac{\mu_0 I_0 \cos \omega t}{2\pi} (L - 2w_d) \int_{a_1}^{b_1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}} dx \quad (\text{A.9})$$

Os limites de integração são determinados novamente pela geometria da Figura A.1 e dados por,

$$a_1 = \frac{d}{2} - \frac{w_c}{2} + w_d \quad (\text{A.10})$$

e

$$b_1 = \frac{d}{2} - \frac{w_c}{2} - w_d \quad (\text{A.11})$$

Em (A.9), a solução da integral resulta em

$$\int_{a_1}^{b_1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + g^2}} dx = \frac{1}{2} \ln(b_1^2 + g^2) - \frac{1}{2} \ln(a_1^2 + g^2) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{b_1^2 + g^2}{a_1^2 + g^2} \right) \quad (\text{A.12})$$

Substituindo (A.12) em (A.9), tem-se

$$\Phi = \frac{\mu_0 I_0 \cos \omega t}{4\pi} c_1 \ln \left(\frac{b_1^2 + g^2}{a_1^2 + g^2} \right) \quad (\text{A.13})$$

onde $c_1 = L - 2w_d$.

Com (A.13) em (A.1), obtém-se a tensão induzida em uma espira,

$$v_0 = \frac{\omega \mu_0 I_0}{4\pi} c_1 \ln \left(\frac{b_1^2 + g^2}{a_1^2 + g^2} \right) \text{sen} \omega t \quad (\text{A.14})$$

O resultado de (A.14) pode ser estendido para o caso de uma bobina com N espiras, como a mostrada na Figura A.2. Para a n ésima espira, os fatores a_n , b_n e c_n são determinados considerando a distância w_s entre as espiras, ou seja,

$$a_n = \frac{d}{2} - \frac{w_c}{2} + nw_d + (n-1)w_s = \frac{d}{2} - \frac{1}{2}[w_c - 2nw_d - 2(n-1)w_s] \quad (\text{A.15})$$

$$b_n = \frac{d}{2} + \frac{w_c}{2} - nw_d - (n-1)w_s = \frac{d}{2} + \frac{1}{2}[w_c - 2nw_d - 2(n-1)w_s] \quad (\text{A.16})$$

$$c_n = L - 2nw_d - 2(n-1)w_s \quad (\text{A.17})$$

Considerando-se, ainda, o cabo constituído de dois fios condutores, a tensão detectada para o caso da bobina com N espiras é finalmente dada por,

$$v_0 = \frac{\omega\mu_0 I_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N c_n \ln\left(\frac{b_n^2 + g^2}{a_n^2 + g^2}\right) \text{sen}\omega t \quad (\text{A.18})$$

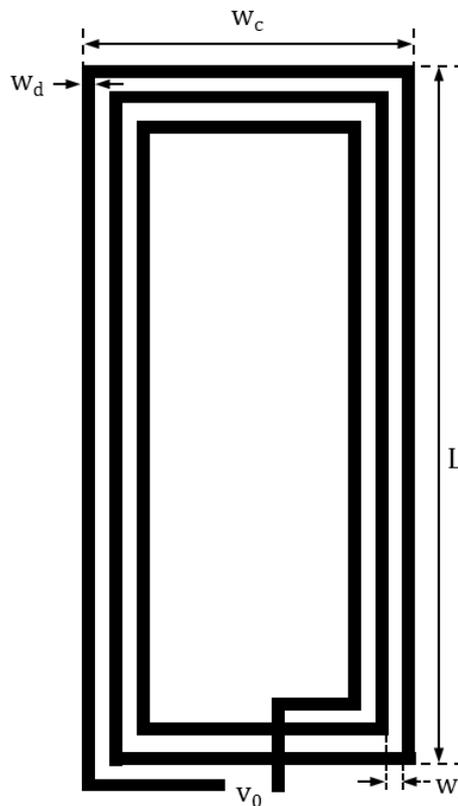


Figura A.2 – Sensor constituído de uma bobina com N espiras.

De (A.18), a amplitude da tensão detectada pelo sensor pode ser determinada em função do número de espiras da bobina. Considerando a frequência da rede elétrica $f = 60$ Hz, a amplitude da corrente $I_0 = 1$ A e a permeabilidade do vácuo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, no gráfico da Figura A.3 é mostrada a variação da amplitude da tensão detectada V_0 em função de N para dois valores de comprimento L da bobina. Os outros parâmetros geométricos da bobina e do fio são indicados na Figura A.3.

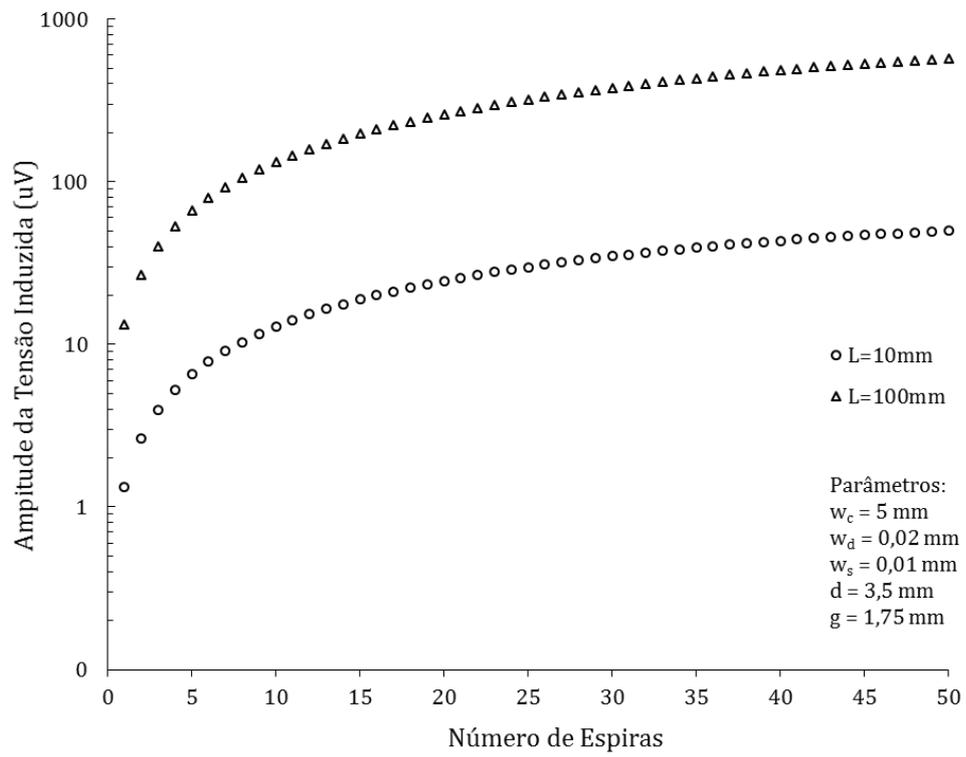


Figura A.3 – Tensão induzida no sensor colocado sobre o cabo de alimentação.