www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/kjnpqw16

# Transmissão de energia sem fio

Wireless power transmission

Danilo Oliveira Duarte[1]
Marcelo O'Donnell Krause[2]
José Carlos Mendes Pires[3]
Ittana de Oliveira Lins[4]

## RESUMO

A transmissão de energia sem fio (Wireless Power Transfer – WPT) permite transferir energia elétrica entre uma fonte e uma carga sem conexão condutiva direta. Este trabalho analisa os fundamentos eletromagnéticos e circuitais dos sistemas de acoplamento indutivo e magnético ressonante, com ênfase na topologia de compensação série-série. A pesquisa é de natureza aplicada, abordagem quantitativa e caráter exploratório, desenvolvida por revisão bibliográfica, cálculos de dimensionamento e análise comparativa de resultados experimentais publicados. Para o modelo de referência do trabalho, consideram-se duas bobinas de 50 µH, coeficiente de acoplamento de 0,20 e frequência de 100 kHz, resultando em indutância mútua de 10 µH e capacitâncias ideais de aproximadamente 50,66 nF por circuito. Esses valores são parâmetros de projeto, não medições físicas. A análise de evidências experimentais publicadas mostra a amplitude de desempenho da tecnologia: Kurs *et al.* (2007) demonstraram transferência de 60 W com eficiência próxima de 40% a distância superior a 2 m; Madzharov e Hinov (2026) validaram um protótipo para carregamento veicular estático com 30 kW nominais e eficiência de 80% a 92%, para entreferros de até aproximadamente 100 mm. Os resultados evidenciam que a eficiência depende do conjunto formado por acoplamento, sintonia, geometria, conversores, carga e limites de segurança. Conclui-se que a WPT é tecnicamente viável em diferentes escalas, mas o desempenho de cada implementação deve ser avaliado segundo suas condições e fronteiras de medição.

**Palavras-chave:** energia; indução; eletromagnetismo; eficiência energética; bobinas acopladas.

## ABSTRACT

Wireless power transfer (WPT) enables electrical energy to be transferred between a source and a load without a direct conductive connection. This paper examines the electromagnetic and circuit foundations of inductive and resonant magnetic coupling, emphasizing the series-series compensation topology. The applied, quantitative and exploratory study combines a literature review, design calculations and comparative analysis of published experimental results. The reference model uses two 50 µH coils, a coupling coefficient of 0.20 and an operating frequency of 100 kHz, yielding a mutual inductance of 10 µH and ideal compensation capacitances of approximately 50.66 nF per circuit. These are design

1 Discente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia.
2 Docente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia.
3 Docente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia.
4 Docente do curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Ilhéus, Centro de Ensino Superior, Ilhéus, Bahia.

parameters, not physical measurements. Published experimental evidence illustrates the range of performance: Kurs *et al.* (2007) transferred 60 W at approximately 40% efficiency over more than 2 m; Madzharov and Hinov (2026) experimentally validated a static electric-vehicle charging prototype at 30 kW nominal power, with 80–92% efficiency and air gaps up to approximately 100 mm. The results show that efficiency depends on the combined effects of coupling, tuning, coil geometry, converters, load and safety constraints. WPT is technically feasible at different power scales, but each implementation must be assessed under its own operating conditions and measurement boundaries.

**Keywords:** Energy; induction; electromagnetism; energy efficiency; coupled coils.

# 1 INTRODUÇÃO

A expansão dos dispositivos eletrônicos, da automação industrial e da mobilidade elétrica intensificou a busca por soluções de alimentação que reduzam a dependência de conectores e cabos. Nesse contexto, a transmissão de energia sem fio (Wireless Power Transfer – WPT) permite transferir energia de uma fonte para uma carga por meio de campos eletromagnéticos ou de outros mecanismos físicos, sem ligação condutiva direta. Entre suas aplicações estão carregadores de dispositivos portáteis, implantes biomédicos, sensores industriais e sistemas de recarga de veículos elétricos (Laha *et al.*, 2023; Van Ieperen; Derammelaere; Minnaert, 2026).

Nos sistemas indutivos, uma corrente alternada no enrolamento transmissor produz um campo magnético variável. O fluxo magnético que alcança o enrolamento receptor induz uma força eletromotriz, conforme a lei de Faraday. A inclusão de capacitores de compensação permite formar circuitos ressonantes e melhorar a transferência de potência em uma frequência de operação especificada. A eficiência, entretanto, não depende apenas da ressonância: é influenciada pelo fator de acoplamento, pelo fator de qualidade das bobinas, pelas resistências equivalentes, pela carga e pelas perdas dos conversores (Kurs *et al.*, 2007; Laha *et al.*, 2023).

A literatura experimental demonstra que não existe um único valor de eficiência aplicável a toda tecnologia WPT. Em um experimento seminal, Kurs *et al.* (2007) transferiram 60 W com eficiência aproximada de 40% a uma distância superior a 2 m. Em uma plataforma muito mais recente e voltada ao carregamento estático de veículos elétricos, Madzharov e Hinov (2026) relataram 30 kW nominais e eficiência medida entre 80% e 92%, com entreferro vertical de aproximadamente 70 mm e testes até cerca de 100 mm. As condições, potências e fronteiras de medição são distintas, portanto os valores não constituem uma comparação direta de produtos equivalentes.

Diante desse cenário, estabelece-se o seguinte problema de pesquisa: de que maneira os parâmetros eletromagnéticos e circuitais — especialmente indutância mútua, coeficiente de acoplamento, frequência de ressonância e perdas — condicionam o desempenho de sistemas de transmissão de energia sem fio por acoplamento indutivo e magnético ressonante?

A relevância do estudo está em organizar os fundamentos físicos e de engenharia necessários para interpretar o funcionamento desses sistemas, evitando associar eficiência elevada exclusivamente à presença de ressonância. A análise também permite distinguir parâmetros de projeto, resultados calculados e resultados experimentais publicados, distinção indispensável para a validade de um trabalho científico.

O objetivo geral é analisar os princípios eletromagnéticos e circuitais da transmissão de energia sem fio, com ênfase no acoplamento indutivo e magnético ressonante, identificando os fatores que influenciam a transferência de potência e a eficiência. Como objetivos específicos, busca-se: apresentar os fundamentos de indução eletromagnética; descrever a modelagem de duas bobinas acopladas; calcular os parâmetros de uma condição de referência; discutir as influências da frequência, do acoplamento e das perdas; e confrontar o modelo de referência com demonstrações experimentais publicadas.

# 2 REFERENCIAL TEÓRICO

## 2.1 Fundamentos eletromagnéticos

### 2.1.1 Indução eletromagnética e lei de Faraday

A indução eletromagnética ocorre quando o fluxo magnético concatenado a um circuito varia no tempo. Para uma bobina de N espiras, a força eletromotriz induzida é expressa por $\varepsilon = -N\, d\Phi B/dt$, em que $\Phi B$ é o fluxo magnético, medido em weber. O sinal negativo representa a lei de Lenz: a corrente induzida possui sentido tal que seu campo magnético se opõe à variação de fluxo que a produziu. O fluxo é definido por $\Phi B = \int S\, B \cdot dA$; para campo aproximadamente uniforme, $\Phi B = BA\cos\theta$. Essas relações explicam a geração de tensão no receptor e a influência da posição relativa entre bobinas (Sadiku, 2015).

### 2.1.2 Equações de Maxwell

A descrição macroscópica dos campos eletromagnéticos é consolidada pelas equações de Maxwell: $\nabla \cdot D = \rho ; \nabla \cdot B = 0 ; \nabla \times E = -\partial B/\partial t$; e $\nabla \times H = J + \partial D/\partial t$. A lei de

Faraday relaciona campo elétrico induzido à variação temporal do campo magnético, enquanto a lei de Ampère-Maxwell relaciona correntes de condução e deslocamento à circulação do campo magnético. Em conjunto, essas equações sustentam a análise dos campos e da transferência de energia entre os enrolamentos (Sadiku, 2015; Hayt; Buck, 2012).

### 2.1.3 Campo próximo e campo distante

Em campo próximo, a transferência indutiva ocorre predominantemente pela interação magnética entre bobinas, com forte dependência da geometria e do acoplamento. Em campo distante, a energia é transportada por ondas eletromagnéticas radiadas e a análise requer parâmetros de antenas, propagação e diretividade. A equação de Friis pode estimar a potência recebida em condições de campo distante e espaço livre, mas não deve ser aplicada diretamente ao acoplamento indutivo em campo próximo (Balanis, 2016).

## 2.2 Principais métodos de transmissão de energia sem fio

### 2.2.1 Acoplamento indutivo

O acoplamento indutivo utiliza duas bobinas separadas fisicamente. A corrente alternada no primário cria fluxo magnético variável, parte do qual atravessa o secundário e induz tensão. O princípio é semelhante ao de um transformador, mas o entreferro e a ausência de um núcleo magnético comum tornam o acoplamento mais sensível à distância e ao desalinhamento. A técnica é amplamente empregada em carregadores de dispositivos e em aplicações de maior potência (Laha *et al.*, 2023).

### 2.2.2 Acoplamento magnético ressonante

O acoplamento magnético ressonante acrescenta capacitores aos circuitos transmissor e receptor para compensar a reatância indutiva em uma frequência determinada. A sintonia pode elevar a corrente útil e melhorar a transferência sob condições de acoplamento relativamente fraco, mas não elimina perdas nem garante eficiência elevada por si só. Kurs *et al.* (2007) demonstraram experimentalmente transferência não radiativa de 60 W, com eficiência aproximada de 40%, a distâncias superiores a 2 m.

## 2.3 Modelagem elétrica das bobinas acopladas

### 2.3.1 Indutância própria e indutância mútua

A indutância própria L relaciona o fluxo concatenado à corrente que o produz. Em duas bobinas acopladas, a indutância mútua M representa o fluxo produzido por uma bobina

que concatena a outra. Para duas bobinas passivas, $M = k\sqrt{(L1\,L2)}$ , em que k é o coeficiente de acoplamento. As equações fasoriais do modelo linear podem ser escritas como $V_1 = (R_1 + j\omega L_1) I_1 + j\omega M_{I2}\, e\, V_2 = j\omega M_{I1} + (R_2 + j\omega L_2) I_2$ , com os sinais dos termos mútuos dependentes da convenção dos pontos. A carga e os capacitores de compensação devem ser incorporados às impedâncias dos respectivos circuitos (Hayt; Buck, 2012; Sadiku, 2015).

### 2.3.2 Fator de acoplamento magnético

O coeficiente $k = M / \sqrt{(L1\,L2)}$ quantifica o acoplamento entre os enrolamentos. Em sistemas passivos convencionais, seu módulo situa-se entre zero e um. Valores menores indicam que uma parcela reduzida do fluxo de uma bobina concatena a outra. Distância, deslocamento lateral, desalinhamento angular, dimensões e geometria influenciam k. Um k maior tende a favorecer a transferência, mas não determina isoladamente a eficiência, pois as perdas resistivas, o fator de qualidade, a carga e a compensação também são relevantes (Laha *et al.*, 2023).

### 2.3.3 Fator de qualidade das bobinas

O fator de qualidade Q expressa a relação entre energia reativa armazenada e energia dissipada por ciclo. Para um indutor com resistência série equivalente R, $Q = \omega L / R = 2\pi f L / R$ . Em geral, Q elevado indica perdas resistivas menores em relação à energia reativa armazenada. Em frequências elevadas, o efeito pelicular e o efeito de proximidade podem aumentar a resistência efetiva dos condutores, reduzindo Q.

## 2.4 Ressonância e redes de compensação

### 2.4.1 Frequência de ressonância

Em um circuito LC ideal, a frequência angular de ressonância é $\omega 0 = 1/\sqrt{(LC)}$ , e a frequência em hertz é $f0 = 1/(2\pi\sqrt{(LC)})$ . Para dimensionamento preliminar, a capacitância pode ser obtida por $C = 1/[(2\pi f 0)^2 L]$ . Em circuitos reais, resistência série, capacitâncias parasitas, tolerâncias, carga e acoplamento alteram a resposta e podem deslocar a frequência de ressonância.

### 2.4.2 Topologias de compensação

As topologias básicas combinam capacitores em série ou paralelo com as bobinas transmissora e receptora: série-série (SS), série-paralelo (SP), paralelo-série (PS) e paralelo-paralelo (PP). A topologia SS é adotada no modelo de referência deste trabalho. A escolha influencia impedância de entrada, corrente, tensão, sensibilidade à carga e comportamento sob variações de acoplamento. Redes LCC e outras configurações podem ser utilizadas quando se exige maior controle de corrente ou tensão (Laha *et al.*, 2023).

## 2.5 Fatores que influenciam o desempenho da transferência

### 2.5.1 Distância e desalinhamento

O aumento do entreferro ou o deslocamento lateral geralmente reduz a parcela do fluxo que concatena o receptor, diminuindo M e k. A relação exata depende da geometria e não pode ser determinada apenas pela distância: requer cálculo eletromagnético, medição ou simulação de campo. O alinhamento deve, portanto, ser tratado como variável de projeto.

### 2.5.2 Geometria e materiais das bobinas

Diâmetro, número de espiras, seção do condutor, espaçamento entre espiras e materiais magnéticos influenciam L, R, Q e a distribuição do campo. Ferrites podem direcionar o fluxo e reduzir dispersão, mas apresentam perdas dependentes da frequência e da densidade de fluxo. O projeto deve equilibrar volume, custo, fator de qualidade, acoplamento e aquecimento.

### 2.5.3 Perdas elétricas e magnéticas

As perdas incluem dissipação Joule nos enrolamentos, perdas no núcleo magnético, perdas dielétricas nos capacitores e perdas de condução e comutação nos semicondutores. Por isso, é necessário distinguir eficiência do enlace magnético e eficiência global, esta última medida entre a entrada de energia do sistema e a saída útil na carga. A definição da fronteira de medição é essencial para comparar resultados de diferentes estudos.

## 2.6 Eficiência e transferência de potência

A eficiência é $\eta = (Psaída / Pentrada) \times 100\,\%$ . Para uma carga resistiva, a potência média pode ser calculada por $P = Vrms\, Irms$ ou $P = Irms^2\, R$ . A eficiência global deve incluir os estágios de conversão que estejam dentro da fronteira de medição; a eficiência DC–

DC, por exemplo, pode incluir inversor e retificador. Uma tensão induzida elevada não garante potência útil elevada: devem ser consideradas corrente, carga e perdas.

### 2.6.1 Exemplo de dimensionamento inicial

Adotando os valores de referência do artigo, $L1 = L2 = 50\,\mu H$, $k = 0,20$ e $f0 = 100\,kHz$. A indutância mútua é $M = 0,20\sqrt{(50 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-6})} = 10\,\mu H$. A capacitância ideal para cada bobina é $C = 1/\left[(2\pi \times 100 \times 10^{3})^2 \times 50 \times 10^{-6}\right] \approx 50,66\,nF$. Esses resultados são cálculos derivados dos parâmetros adotados, não dados experimentais.

## 2.7 Eletrônica de potência aplicada à WPT

A maioria dos sistemas WPT utiliza um inversor para converter a tensão contínua da fonte em corrente alternada de alta frequência no transmissor. No receptor, a tensão induzida pode ser retificada e filtrada para alimentar a carga ou carregar uma bateria. Perdas de condução e comutação nos semicondutores afetam a eficiência global. Técnicas de comutação suave, como ZVS (Zero Voltage Switching) e ZCS (Zero Current Switching), podem reduzir perdas em condições de operação apropriadas.

## 2.8 Transmissão radiativa, segurança e aplicações

Sistemas radiativos utilizam antenas e ondas eletromagnéticas em radiofrequência ou micro-ondas. Em campo distante, a equação de Friis relaciona potência recebida, potência transmitida, ganhos das antenas, comprimento de onda e distância (Balanis, 2016). Esse mecanismo difere do acoplamento magnético de campo próximo.

As aplicações da WPT incluem eletrônicos portáteis, equipamentos biomédicos, sensores e veículos elétricos. A norma SAE J2954_202408 estabelece requisitos de interoperabilidade, compatibilidade eletromagnética, desempenho e segurança para carregamento sem fio estacionário de veículos leves, com níveis de potência até 11 kVA. A norma não deve ser interpretada como especificação de carregamento dinâmico (SAE International, 2024).

A exposição a campos eletromagnéticos deve ser avaliada na faixa de frequência e nas condições reais de funcionamento. As diretrizes ICNIRP de 2020 abrangem campos de radiofrequência entre 100 kHz e 300 GHz; para frequências e situações específicas, devem ser consultadas as referências normativas aplicáveis, sem extrapolar automaticamente limites de uma faixa para outra (ICNIRP, 2020).

## 2.9 Pesquisas recentes e tecnologias emergentes

A evolução recente envolve novas geometrias de acopladores, redes de compensação, conversores de maior eficiência, controle adaptativo e requisitos de segurança. Uma revisão empírica publicada em 2026 sistematizou 133 demonstrações experimentais de WPT publicadas entre 2020 e 2025, sendo 78 sistemas indutivos e 55 capacitivos. O estudo identificou eficiências superiores a 90% em diferentes condições e apontou a permanência do IPT em aplicações de potência muito elevada e maiores entreferros (Van Ieperen; Derammelaere; Minnaert, 2026).

## 2.10 Relação do referencial teórico com a proposta do trabalho

A lei de Faraday fundamenta a tensão induzida; a indutância mútua e o coeficiente de acoplamento descrevem a interação entre bobinas; Q representa a relação entre armazenamento reativo e perdas; e a frequência de ressonância orienta o dimensionamento dos capacitores. Esses parâmetros organizam a análise do modelo de referência e permitem interpretar resultados experimentais publicados, sem confundir cálculo teórico com validação física.

# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

## 3.1 Caracterização da pesquisa

A pesquisa é aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo. O procedimento combina revisão bibliográfica, cálculos analíticos de dimensionamento e análise comparativa de resultados experimentais publicados. Não foi realizada medição própria nem executada simulação MATLAB/Simulink comprovada por arquivos de projeto ou relatórios de execução; por isso, o trabalho não atribui resultados fictícios a um protótipo ou software.

## 3.2 Levantamento bibliográfico

Foram priorizados artigos científicos revisados por pares, publicações técnicas e documentos normativos com dados quantitativos rastreáveis. Para a comparação experimental, foram selecionados: o experimento de ressonância magnética de Kurs *et al.* (2007), por apresentar potência, eficiência e distância; a plataforma de carregamento estático de Madzharov e Hinov (2026), por apresentar potência nominal, faixa de eficiência, entreferro

e parâmetros do acoplador; e a revisão empírica de van Ieperen, Derammelaere e Minnaert (2026), por consolidar 133 publicações experimentais.

## 3.3 Modelagem matemática do sistema

O modelo de referência considera duas bobinas magneticamente acopladas, com compensação série-série. A indutância mútua é calculada por $M = k\sqrt{(L1\,L2)}$ , e a frequência de ressonância ideal por $f0 = 1/\left(2\pi\sqrt{(LC)}\right)$ . A eficiência, quando as potências de entrada e saída são conhecidas, é calculada por $\eta = (Psaída / Pentrada) \times 100\,\%$ . Como o documento de origem não informa resistência dos enrolamentos, resistência de carga, tensão de alimentação nem resultados de simulação, não é possível determinar de forma única as correntes, potências ou eficiência do circuito específico.

## 3.4 Definição dos parâmetros elétricos

Os parâmetros originalmente propostos são preservados como valores de referência para dimensionamento. A capacitância foi recalculada pela expressão ideal de ressonância, confirmando o valor aproximado apresentado no documento original.

**Tabela 1 –** Parâmetros elétricos do modelo de referência

| **Parâmetro** | **Símbolo** | **Valor** | **Natureza do dado** |
|---|---|---|---|
| Indutância da bobina transmissora | L1 | 50 µH | Parâmetro adotado |
| Indutância da bobina receptora | L2 | 50 µH | Parâmetro adotado |
| Coeficiente de acoplamento | k | 0,20 | Parâmetro adotado |
| Indutância mútua | M | 10 µH | Calculado |
| Frequência de operação | f0 | 100 kHz | Parâmetro adotado |
| Capacitância do transmissor | C1 | 50,66 nF | Calculado (LC ideal) |
| Capacitância do receptor | C2 | 50,66 nF | Calculado (LC ideal) |

Fonte: elaborado pelos autores (2026), a partir dos parâmetros do projeto.

## 3.5 Procedimento de análise dos dados

Os valores experimentais foram transcritos das publicações originais e organizados segundo potência, eficiência, distância/entreferro e características do acoplador. Os resultados são apresentados em tabela e gráfico de intervalos. A comparação é descritiva: as fronteiras de medição, as frequências, as geometrias e os objetivos dos protótipos não são idênticos. Não se calcula média entre estudos heterogêneos.

## 3.6 Limitações do estudo

O trabalho não apresenta ensaio experimental próprio, protótipo físico ou arquivo de simulação executável. Os valores de 50 µH, k = 0,20 e 100 kHz são parâmetros adotados para dimensionamento, não medições. Os resultados de eficiência e potência apresentados na seção seguinte pertencem aos estudos publicados citados. A ausência de resistência dos enrolamentos, carga e alimentação impede estimar a eficiência do circuito de referência. Além disso, os estudos publicados podem utilizar fronteiras de medição diferentes, limitando comparações diretas.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 Resultados do dimensionamento do modelo de referência

O dimensionamento matemático confirma que duas bobinas de 50 µH, operando idealmente a 100 kHz, requerem capacitâncias de compensação de aproximadamente 50,66 nF. Com k = 0,20, a indutância mútua calculada é 10 µH. Esses resultados são coerentes com as relações fundamentais de circuitos acoplados e ressonantes. Contudo, eles não determinam a potência transferida: para isso seriam necessários, no mínimo, resistência série equivalente de cada bobina, tensão e forma de onda da fonte, resistência da carga e modelo de perdas.

## 4.2 Evidências experimentais publicadas

Os dados experimentais publicados demonstram aplicações em escalas muito distintas. Kurs *et al.* (2007) relataram 60 W transferidos com eficiência aproximada de 40% a distância superior a 2 m. O artigo também informa que o modelo quantitativo desenvolvido pelos autores reproduziu os resultados experimentais com discrepância de até 5%. Esse resultado é relevante por demonstrar transferência não radiativa em distância expressiva em relação ao tamanho dos ressonadores, mas não deve ser tratado como eficiência típica dos carregadores atuais.

**Tabela 2 –** Resultados experimentais publicados de sistemas WPT

| **Estudo** | **Potência reportada** | **Eficiência** | **Distância / entreferro** | **Observações** |
|---|---|---|---|---|
| Kurs et al. (2007) | 60 W | ≈ 40% | Superior a 2 m | Ressonadores magnéticos; transferência não radiativa |
| Madzharov; Hinov (2026) | 30 kW nominais; pico de 45 kW por 1 min | 80–92% | Entreferro até ≈ 100 mm; operação favorável em ≈ 70 mm | Protótipo de carregamento estático de veículo elétrico; bobinas ≈ 60 µH; k ≈ 0,45 |

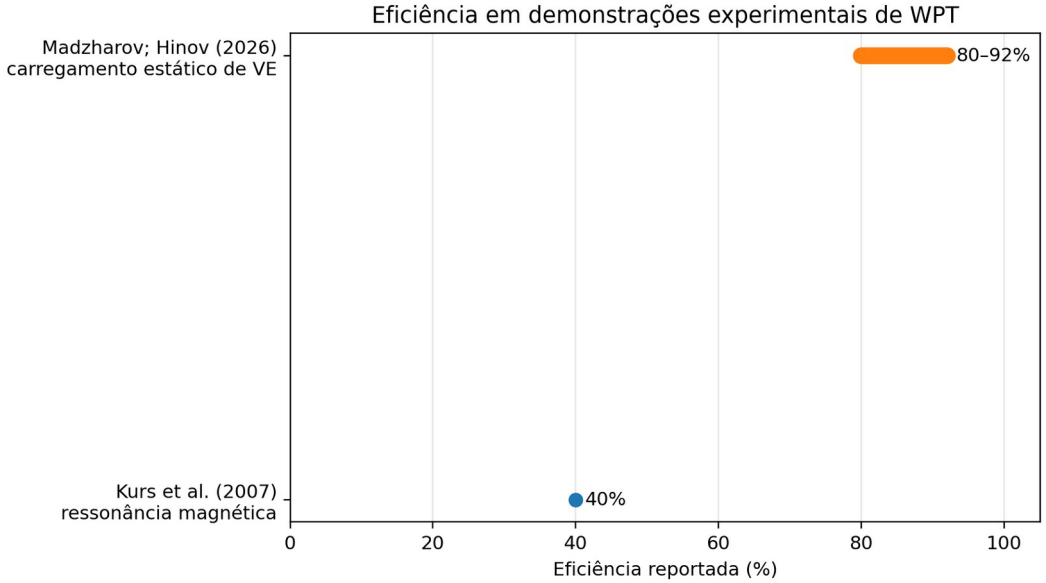
Fonte: Kurs *et al.* (2007) e Madzharov e Hinov (2026). Valores reproduzidos conforme os estudos citados.

Madzharov e Hinov (2026) reportaram acopladores transmissor/receptor de aproximadamente 700 × 800 × 60 mm, indutância próxima de 60 µH, fator de acoplamento em torno de 0,45 e perdas nas bobinas estimadas em aproximadamente 2%. O protótipo foi validado experimentalmente em nível nominal de 30 kW, com capacidade de pico de 45 kW por um minuto. A eficiência medida variou entre 80% e 92%, com operação favorável em torno de 30 kW e entreferro vertical de aproximadamente 70 mm.

## 4.3 Comparação da eficiência reportada

A Figura 1 apresenta os intervalos de eficiência dos dois estudos selecionados. O valor de Kurs *et al.* é pontual e aproximado; o de Madzharov e Hinov corresponde a uma faixa experimental. O gráfico não representa uma curva de desempenho de um mesmo equipamento nem permite concluir que a diferença decorre apenas do avanço temporal. Potência, distância, geometria, eletrônica de potência e fronteiras de medição são diferentes.

**Figura 1 –** Eficiência reportada em duas demonstrações experimentais de WPT




Fonte: elaborado pelos autores com dados de Kurs *et al.* (2007) e Madzharov e Hinov (2026).

## 4.4 Discussão dos resultados à luz da literatura

A comparação evidencia um compromisso de engenharia entre distância e potência. O experimento de Kurs *et al.* (2007) demonstra que ressonadores fortemente acoplados podem transferir dezenas de watts a distâncias superiores a dois metros, mas com eficiência aproximada de 40%. Já a plataforma de Madzharov e Hinov (2026) alcança dezenas de quilowatts e eficiência de até 92%, porém com entreferro da ordem de centímetros e acoplador de grandes dimensões. Não se trata de uma evolução linear da mesma configuração, mas de soluções projetadas para regimes de aplicação distintos.

A revisão de van Ieperen, Derammelaere e Minnaert (2026), baseada em 133 demonstrações experimentais publicadas entre 2020 e 2025 (78 IPT e 55 CPT), indica que eficiências superiores a 90% são recorrentes em diferentes condições experimentais. A revisão também identifica o domínio do IPT em implementações de potência muito elevada e maiores entreferros, enquanto sistemas capacitivos ampliaram seu campo de aplicação. Esse panorama reforça que a avaliação da WPT deve considerar simultaneamente potência, distância, eficiência, área dos acopladores e tecnologia empregada.

O modelo de referência deste trabalho, com k = 0,20, apresenta acoplamento menor que o valor aproximado k = 0,45 reportado para o acoplador veicular de Madzharov e Hinov (2026). Essa diferença não permite prever diretamente uma diferença percentual de eficiência: o acoplamento atua em conjunto com Q, frequência, compensação, carga e conversores. Uma

investigação quantitativa do efeito de k exigiria resolver o circuito equivalente completo, com resistências e carga definidas, ou executar simulação eletromagnética/circuital validada.

A ressonância é condição importante para reduzir a reatância resultante e favorecer a transferência de potência, mas não elimina perdas. O resultado prático depende do casamento de impedâncias, da qualidade dos componentes, da estabilidade da frequência e da variação de carga. Assim, a afirmação de que a ressonância, isoladamente, amplia a distância ou garante alta eficiência seria tecnicamente incompleta.

## 4.5 Segurança, normalização e aplicabilidade

A aplicação em veículos elétricos requer requisitos de alinhamento, interoperabilidade, compatibilidade eletromagnética, segurança e ensaios. A SAE J2954_202408 trata de carregamento estacionário de veículos leves e define níveis até 11 kVA. O protótipo de 30 kW citado por Madzharov e Hinov (2026) não deve ser interpretado como demonstração de conformidade com essa norma; é um estudo experimental distinto. De forma complementar, a avaliação de exposição a campos deve utilizar diretrizes e normas adequadas à frequência real do equipamento. A ICNIRP (2020) cobre a faixa de 100 kHz a 300 GHz, mas a aplicação dos limites exige observar a grandeza física, a frequência e o cenário de exposição.

## 4.6 Síntese dos resultados

Os resultados sustentam três conclusões técnicas. Primeiro, o modelo matemático original possui consistência no cálculo de indutância mútua e capacitância ideal. Segundo, resultados experimentais publicados comprovam a viabilidade da WPT desde transferências de dezenas de watts a metros de distância até carregamento veicular na faixa de dezenas de quilowatts em entreferros de centímetros. Terceiro, a eficiência não pode ser atribuída a um único parâmetro: depende do projeto integrado das bobinas, da compensação, da eletrônica de potência, da carga e dos requisitos de segurança. A eficiência do circuito específico de 50 µH e k = 0,20 permanece indeterminada sem parâmetros adicionais e validação.

# 5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou os fundamentos eletromagnéticos e circuitais da transmissão de energia sem fio, com ênfase no acoplamento indutivo e magnético ressonante. A questão de pesquisa foi respondida ao demonstrar que a transferência de energia depende da interação entre indutância mútua, coeficiente de acoplamento, frequência de operação, fator de

qualidade, compensação, carga e perdas dos estágios de conversão. Nenhum desses parâmetros, isoladamente, caracteriza o desempenho global.

O dimensionamento do modelo de referência, com indutâncias de 50 µH, coeficiente de acoplamento de 0,20 e frequência de 100 kHz, resultou em indutância mútua de 10 µH e capacitâncias ideais de aproximadamente 50,66 nF. Esses valores fornecem uma base coerente para a construção de um circuito equivalente série-série, mas não permitem determinar a eficiência ou a potência de saída sem resistências, carga, tensão de alimentação e condições completas de operação.

A análise de resultados experimentais publicados confirmou a viabilidade técnica da WPT em diferentes escalas. O experimento de Kurs *et al.* (2007) demonstrou transferência de 60 W com eficiência próxima de 40% a mais de 2 m. A plataforma de Madzharov e Hinov (2026) apresentou 30 kW nominais e eficiência entre 80% e 92%, em entreferros de até aproximadamente 100 mm. A revisão de van Ieperen, Derammelaere e Minnaert (2026) reforçou a maturidade experimental de sistemas indutivos e capacitivos, com eficiências superiores a 90% relatadas em diferentes configurações.

Conclui-se que a transmissão de energia sem fio constitui uma alternativa tecnicamente relevante, sobretudo quando a eliminação de contatos elétricos oferece vantagens operacionais. Entretanto, a viabilidade de cada aplicação depende de compromisso entre distância, potência, eficiência, dimensões, custo, segurança e complexidade de controle. Como continuidade, recomenda-se completar o modelo com resistências medidas ou justificadas, definir a carga e a fonte, implementar o circuito SS em MATLAB/Simulink ou ferramenta equivalente, realizar varreduras de frequência e acoplamento e, posteriormente, validar os resultados com protótipo e instrumentação. Essa etapa permitirá obter resultados específicos do circuito proposto e quantificar sua eficiência com rastreabilidade.

## REFERÊNCIAS


BALANIS, Constantine A. **Antenna theory**: analysis and design. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

HAYT, William H.; BUCK, John A. **Engineering electromagnetics**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

ICNIRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). **Health Physics**, v. 118, n. 5, p. 483-524, 2020. DOI: https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210.

KURS, André *et al.* Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. **Science**, v. 317, n. 5834, p. 83-86, 2007. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1143254.

LAHA, Arpan *et al.* A comprehensive review on wireless power transfer systems for charging portable electronics. **Eng**, v. 4, n. 2, p. 1023-1057, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/eng4020061.

MADZHAROV, Nikolay; HINOV, Nikolay. Design and experimental validation of an inductive wireless power transfer platform for static EV charging. **Electronics**, v. 15, n. 9, art. 1775, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics15091775.

SADIKU, Matthew N. O. **Elements of electromagnetics**. 6. ed. New York: Oxford University Press, 2015.

SAE INTERNATIONAL. **Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology**. SAE Standard J2954_202408. Warrendale: SAE International, 2024. DOI: https://doi.org/10.4271/J2954_202408.

VAN IEPEREN, Aris; DERAMMELAERE, Stijn; MINNAERT, Ben. Empirical performance survey of inductive and capacitive wireless power transfer systems. **Electronics**, v. 15, n. 8, art. 1575, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics15081575.