



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

YANN BRUNO ANDRADE MELLO

TÍTULO DO TRABALHO

FORTALEZA

2026

YANN BRUNO ANDRADE MELLO

TÍTULO DO TRABALHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Dalton Honório de Araújo

Coorientador: Prof. Me. Paulo Honório Filho

FORTALEZA

2026

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo metodológico do agente para projeto elétrico residencial	23
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regras mínimas de previsão de TUG por tipo de ambiente e potência atribuída	30
Tabela 2 – Dimensões, áreas e perímetros dos ambientes do projeto	37
Tabela 3 – Ambientes e dimensões do Estudo de Caso 2	37
Tabela 4 – Ambientes e dimensões do Estudo de Caso 3	37
Tabela 5 – Cargas mínimas de iluminação (Estudo de caso 1)	38
Tabela 6 – Cargas mínimas de TUG (Estudo de caso 1)	39
Tabela 7 – Cargas mínimas de iluminação (Estudo de caso 2)	39
Tabela 8 – Cargas mínimas de TUG (Estudo de caso 2)	39
Tabela 9 – Cargas mínimas de iluminação (Estudo de caso 3)	40
Tabela 10 – Cargas mínimas de TUG (Estudo de caso 3)	40
Tabela 11 – Divisão em circuitos (Estudo de caso 1)	41
Tabela 12 – Divisão em circuitos (Estudo de caso 2)	41
Tabela 13 – Divisão em circuitos (Estudo de caso 3)	41
Tabela 14 – Seções dos condutores (Estudo de caso 1)	43
Tabela 15 – Dimensionamento dos disjuntores (Estudo de caso 1)	43
Tabela 16 – Seções dos condutores (Estudo de caso 2)	43
Tabela 17 – Dimensionamento dos disjuntores (Estudo de caso 2)	43
Tabela 18 – Seções dos condutores (Estudo de caso 3)	44
Tabela 19 – Dimensionamento dos disjuntores (Estudo de caso 3)	44
Tabela 20 – Tipo de fornecimento e proteção geral (síntese)	44
Tabela 21 – Comparativo geral dos estudos de caso	45
Tabela 22 – Resultado da validação (síntese)	46

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Área efetiva da antena
B	Largura de faixa em que o ruído é medido em Hertz
d	Distância em metros
E	Campo elétrico
FA	Fator da antena
Gr	Ganho de recepção
h	Altura efetiva ou comprimento efetivo de uma antena
I	Corrente elétrica
k	Constante de Boltzmann's
K	Eficiência de irradiação
M	Variação do patamar de ruído em função da RBW
N	Condutor de neutro
NF	Figura de ruído
N_i	Potência do ruído na entrada
N_o	Potência do ruído na saída
P	Potência
R	Resistência
S_i	Potência do sinal na entrada
S_o	Potência do sinal na saída
t	Tempo
V	Tensão
Z_L	Impedância da antena
Z_o	Impedância de referência (50Ω)
λ	Comprimento de onda
Γ	Coefficiente de reflexão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Motivação	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	11
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	11
1.3	Metodologia	11
1.4	Delimitação do escopo	12
1.5	Estrutura do trabalho	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Instalações elétricas residenciais e memorial de cálculo	13
2.1.1	<i>Objetivo do projeto elétrico em Baixa Tensão (BT)</i>	13
2.1.2	<i>O que é memorial e por que ele é útil</i>	14
2.2	Norma ABNT NBR 5410: previsão de cargas mínimas	14
2.2.1	<i>Iluminação (regras por área)</i>	15
2.2.2	<i>Tomadas de uso geral (TUG)</i>	15
2.2.2.1	<i>Banheiros</i>	15
2.2.2.2	<i>Cozinhas, copas, áreas de serviço e locais semelhantes</i>	15
2.2.2.3	<i>Salas e dormitórios</i>	15
2.2.2.4	<i>Demais cômodos e dependências</i>	16
2.2.3	<i>TUE e circuitos dedicados</i>	16
2.3	Divisão em circuitos terminais (NBR 5410 + boas práticas)	16
2.3.1	<i>Separação entre iluminação e TUG</i>	16
2.3.2	<i>Exclusividade para cozinha, área de serviço e TUE</i>	16
2.3.3	<i>Limites típicos por circuito (boas práticas)</i>	17
2.3.4	<i>Circuitos de reserva</i>	17
2.4	Dimensionamento de condutores e proteções (NBR 5410)	17
2.4.1	<i>Corrente de projeto, ampacidade e seção mínima</i>	17
2.4.1.0.1	<i>Corrente de projeto (I_B):</i>	17
2.4.1.0.2	<i>Ampacidade (I_Z):</i>	18
2.4.1.0.3	<i>Seção mínima:</i>	18

2.4.2	<i>Critério de coordenação: $I_B \leq I_N \leq I_Z$</i>	18
2.4.3	<i>Condutores de Proteção (PE) e Neutro</i>	18
2.4.3.0.1	<i>PE (Terra):</i>	18
2.4.3.0.2	<i>Neutro:</i>	18
2.4.4	<i>Hipóteses adotadas no escopo (220 V, B1, PVC)</i>	19
2.5	Tipo de fornecimento e diretrizes da concessionária (ET-124 / ENEL Ceará)	19
2.5.1	<i>Enquadramento do fornecimento pela potência instalada</i>	19
2.5.2	<i>Impactos do tipo de fornecimento no projeto</i>	19
2.6	IA: Modelos de Linguagem (LLM)	20
2.6.1	<i>Conceito, capacidades e limitações</i>	20
2.6.2	<i>Por que LLM sozinho não serve para cálculo normativo</i>	20
2.7	Agentes e uso de ferramentas	20
2.7.1	<i>Conceito de agente</i>	20
2.7.2	<i>Ferramentas determinísticas para cálculos normativos</i>	20
2.7.3	<i>Validação e coerência</i>	21
2.8	Recuperação Aumentada por Busca (RAG) aplicada a normas	21
2.8.1	<i>Justificativa para uso de RAG em normas</i>	21
2.8.2	<i>Pipeline conceitual: indexação, recuperação e síntese</i>	21
2.9	Síntese do capítulo	21
3	METODOLOGIA	22
3.1	Aquisição das informações do projeto e consolidação do escopo	24
3.1.1	<i>Entrada por conversação em linguagem natural</i>	24
3.1.2	<i>Entrada por imagem da planta baixa</i>	25
3.1.3	<i>Estruturação do modelo do imóvel e regras de consistência</i>	25
3.1.4	<i>Critério de encerramento da etapa (escopo “fechado”)</i>	26
3.2	Modelo normativo e estratégia de aplicação	26
3.2.1	<i>Formalização das regras normativas</i>	26
3.2.2	<i>Organização do pipeline de dimensionamento</i>	27
3.2.3	<i>Premissas e limites de escopo adotados</i>	28
3.3	Pipeline de dimensionamento do projeto elétrico	28
3.3.1	<i>Previsão de carga de iluminação</i>	28
3.3.2	<i>Precisão de tomadas de uso geral</i>	29

3.3.3	<i>Tomadas de uso específico - TUE e circuitos dedicados</i>	30
3.3.4	<i>Divisão da instalação em circuitos terminais</i>	30
3.3.5	<i>Previsão de circuitos reserva</i>	31
3.3.6	<i>Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção</i>	31
3.3.7	<i>Balanceamento de fases</i>	32
3.3.8	<i>Verificação final e retorno para correções</i>	32
3.4	Geração do memorial de cálculo e organização da documentação do projeto	32
3.4.1	<i>Organização do memorial</i>	32
3.4.2	<i>Rastreabilidade entre método e documento</i>	34
3.5	Estratégia de validação da metodologia	34
3.5.1	<i>Base de referência e dados utilizados</i>	35
3.5.2	<i>CrITÉRIOS de avaliação e equivalência aceitável</i>	35
4	RESULTADOS	36
4.1	Estudos de caso e dados de entrada	36
4.1.1	<i>Estudo de caso 1</i>	36
4.1.2	<i>Estudo de caso 2</i>	37
4.1.3	<i>Estudo de caso 3</i>	37
4.1.4	<i>Premissas gerais adotadas nos três estudos de caso</i>	38
4.2	Previsão de cargas mínimas por ambiente	38
4.2.1	<i>Estudo de caso 1</i>	38
4.2.2	<i>Estudo de caso 2</i>	39
4.2.3	<i>Estudo de caso 3</i>	40
4.3	Divisão em circuitos terminais	40
4.3.1	<i>Estudo de caso 1</i>	42
4.3.2	<i>Estudo de caso 2</i>	42
4.3.3	<i>Estudo de caso 3</i>	42
4.4	Dimensionamento dos circuitos	42
4.4.1	<i>Estudo de caso 1</i>	44
4.4.2	<i>Estudo de caso 2</i>	44
4.4.3	<i>Estudo de caso 3</i>	44
4.5	Determinação do tipo de fornecimento e proteção geral	44
4.6	Síntese comparativa dos estudos de caso	45

4.7	Discussão e validação dos resultados	45
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
5.1	Conclusões	47
5.2	Contribuições do trabalho	48
5.3	Limitações	48
5.4	Trabalhos futuros	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, modelos de linguagem de grande porte (*Large Language Models* – LLMs) e técnicas de recuperação de informação têm ampliado as possibilidades de sistemas capazes de interagir em linguagem natural e apoiar atividades técnicas (NGUYEN; KITTUR, 2025). Em diferentes áreas da engenharia, observa-se um movimento de adoção de soluções baseadas em inteligência artificial para acelerar etapas repetitivas, reduzir retrabalho e melhorar a rastreabilidade de decisões (ADEBAYO *et al.*, 2025).

No contexto de instalações elétricas residenciais de baixa tensão, uma parte relevante do trabalho de projeto envolve a consolidação de requisitos do imóvel, o levantamento de cargas mínimas por ambiente, a organização em circuitos terminais e o dimensionamento inicial de condutores e dispositivos de proteção, sempre sob restrições normativas. No Brasil, a ABNT NBR 5410 estabelece critérios mínimos e requisitos de segurança para instalações elétricas de baixa tensão, incluindo regras objetivas para previsão de cargas e pontos de utilização, além de diretrizes associadas à organização dos circuitos. Adicionalmente, diretrizes da concessionária podem influenciar decisões como o tipo de fornecimento aplicável e critérios de entrada de energia.

Apesar do potencial de LLMs em tarefas de linguagem, o uso direto desses modelos para dimensionamento elétrico apresenta desafios, especialmente quanto à necessidade de conformidade normativa, reprodutibilidade e justificativa técnica (NGUYEN; KITTUR, 2025). Dessa forma, este trabalho investiga uma abordagem que combina interação em linguagem natural e recuperação de conhecimento normativo (RAG) (LEWIS *et al.*, 2020) com rotinas determinísticas de cálculo e verificação, visando produzir resultados consistentes, auditáveis e úteis como ponto de partida para o projetista.

1.1 Motivação

A motivação central deste trabalho é demonstrar que é possível empregar técnicas modernas de inteligência artificial para apoiar a engenharia elétrica de forma responsável, preservando o caráter normativo do domínio. Em particular, busca-se contribuir para o aumento de produtividade na etapa inicial de projeto, reduzindo o tempo dedicado a tarefas repetitivas e fornecendo rapidamente um memorial de cálculo com rastreabilidade das premissas e resultados.

Do ponto de vista acadêmico, a proposta também é relevante por aproximar o

discente de um fluxo de projeto estruturado e por permitir comparações objetivas com soluções de referência, evidenciando invariantes normativas e variações legítimas por critério de projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar uma metodologia, implementada em um protótipo funcional, para um agente baseado em LLM com Recuperação Aumentada (RAG) capaz de realizar o dimensionamento inicial de instalações elétricas residenciais de baixa tensão e gerar automaticamente um memorial de cálculo, em conformidade com critérios aplicáveis da ABNT NBR 5410 e diretrizes locais consideradas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estruturar a aquisição e consolidação de requisitos do projeto por meio de conversação em linguagem natural e/ou interpretação de planta baixa em formato de imagem.
- Construir um modelo estruturado do imóvel para armazenar ambientes, dimensões e cargas previstas, mantendo rastreabilidade entre entradas, resultados intermediários e saídas.
- Implementar um pipeline determinístico para previsão de cargas mínimas, divisão em circuitos terminais, dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção, e determinação do tipo de fornecimento.
- Realizar verificações de conformidade nas etapas do pipeline, prevendo realimentação quando inconsistências forem detectadas.
- Validar o método por meio de estudos de caso didáticos, comparando resultados com referências acadêmicas (gabaritos e soluções manuais).

1.3 Metodologia

A pesquisa adota uma abordagem aplicada, com implementação de um protótipo funcional e avaliação por estudos de caso. O método integra: (i) aquisição de informações por texto e/ou imagem; (ii) consolidação das entradas em um modelo estruturado do imóvel; (iii) execução de rotinas determinísticas baseadas em regras normativas para cálculo de cargas, divisão de circuitos e dimensionamentos; e (iv) comparação dos resultados com materiais de

referência do contexto didático. O detalhamento completo do método é apresentado no Capítulo 3 e os resultados da validação no Capítulo 4.

1.4 Delimitação do escopo

O escopo deste trabalho concentra-se no dimensionamento inicial de instalações residenciais de baixa tensão, contemplando cargas mínimas de iluminação e tomadas de uso geral, divisão em circuitos terminais, dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção por critérios de capacidade de condução de corrente e coordenação entre proteção e condutor, e determinação do tipo de fornecimento conforme diretrizes locais consideradas. Aspectos como queda de tensão, curto-circuito, DR, DPS, aterramento e diagramas unifilares são tratados como extensões futuras.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a contextualização, motivação, objetivos, metodologia e estrutura do texto. O Capítulo 2 discute a fundamentação teórica necessária, incluindo normas e conceitos relacionados a instalações residenciais e aos princípios de agentes baseados em LLMs e RAG. O Capítulo 3 descreve a metodologia proposta. O Capítulo 4 apresenta os resultados e a validação por estudos de caso. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões, limitações e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo reúne os principais conceitos necessários para compreender a proposta e os resultados deste trabalho. Inicialmente, são discutidos fundamentos relacionados a instalações elétricas residenciais de baixa tensão, com ênfase no papel do *memorial de cálculo* como documento técnico de consolidação do raciocínio de projeto. Em seguida, são apresentados os fundamentos normativos empregados no levantamento de cargas mínimas, na divisão em circuitos terminais e nos critérios de dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção, tomando como base a ABNT NBR 5410 (??) e as diretrizes da concessionária consideradas no estudo (??).

Além da fundamentação normativa, este capítulo também introduz os conceitos computacionais que viabilizam a automatização parcial do processo de elaboração do memorial de cálculo, incluindo noções de Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs), agentes com uso de ferramentas e Recuperação Aumentada por Busca (RAG). Destaca-se, ainda, a separação entre: (i) componentes determinísticos, responsáveis pelos cálculos e pela aplicação consistente das regras; e (ii) componentes linguísticos, responsáveis por organizar, explicar e apresentar os resultados de forma coerente e rastreável ao usuário. Por fim, são contextualizados os fundamentos associados à interpretação de informações a partir de plantas em imagem e suas limitações práticas, uma vez que a qualidade e precisão da entrada impactam diretamente as estimativas utilizadas nas etapas de cálculo.

2.1 Instalações elétricas residenciais e memorial de cálculo

2.1.1 *Objetivo do projeto elétrico em Baixa Tensão (BT)*

Uma instalação elétrica residencial de baixa tensão pode ser entendida como o conjunto de circuitos, condutores, dispositivos de proteção, pontos de utilização e quadros de distribuição destinados a atender, com segurança e funcionalidade, as demandas de energia elétrica de uma unidade habitacional. Em termos de projeto, busca-se garantir o suprimento adequado das cargas previstas, assegurando simultaneamente requisitos fundamentais como proteção contra sobrecorrentes, limitação de efeitos térmicos, organização e manutenção, conforme práticas normativas e de engenharia adotadas no contexto nacional.

No processo tradicional de elaboração de um projeto elétrico residencial, parte-se

de um levantamento de cargas, que pode ser baseado em prescrições mínimas normativas e/ou em equipamentos efetivamente previstos, para então definir a potência instalada e proceder à divisão da instalação em circuitos terminais. Essa divisão impacta diretamente a organização do quadro de distribuição, a seleção dos condutores, a escolha dos dispositivos de proteção e, quando aplicável, a distribuição de cargas entre fases.

2.1.2 O que é memorial e por que ele é útil

O *memorial de cálculo* representa um documento técnico que consolida, de forma estruturada, os principais elementos do raciocínio de projeto. Em geral, ele registra: (i) hipóteses e critérios adotados; (ii) levantamento e composição de cargas; (iii) divisão em circuitos; (iv) dimensionamento de condutores; (v) dimensionamento e seleção de dispositivos de proteção; e (vi) sínteses e tabelas finais que facilitem a verificação e o uso posterior do documento. Neste trabalho, o memorial de cálculo é o principal artefato de saída do sistema proposto e, na versão atual, é gerado automaticamente em formato de documento **Microsoft Word**.

A utilidade do memorial de cálculo é múltipla. Do ponto de vista técnico, ele fornece *rastreabilidade*: permite que um terceiro compreenda quais regras, premissas e verificações levaram aos valores e escolhas apresentados. Do ponto de vista de validação, o memorial facilita a checagem de coerência entre carga prevista, circuitos definidos, seções de condutores e proteções especificadas, reduzindo ambiguidades e erros de comunicação. Em cenários acadêmicos e profissionais, esse tipo de registro também tem valor por tornar o projeto *auditável*, isto é, verificável a partir de critérios explicitados.

2.2 Norma ABNT NBR 5410: previsão de cargas mínimas

Uma etapa essencial do projeto elétrico residencial é a **previsão de cargas mínimas** associadas a *iluminação e tomadas de uso geral*. Na ausência de um levantamento completo baseado em equipamentos efetivamente definidos, a ABNT NBR 5410 estabelece **critérios prescritivos mínimos** que permitem estimar a carga instalada de forma padronizada e consistente (??).

De modo geral, a norma utiliza valores em **VA** para essas previsões mínimas, pois se trata de uma estimativa de potência aparente associada a pontos de utilização típicos.

2.2.1 Iluminação (regras por área)

Para circuitos de iluminação, a ABNT NBR 5410 define uma carga mínima por cômodo ou dependência em função de sua área (??). Em termos práticos:

- **Ambientes com área $A \leq 6 \text{ m}^2$:** deve ser prevista **carga mínima de 100 VA**.
- **Ambientes com área $A > 6 \text{ m}^2$:** deve ser prevista **carga mínima de 100 VA** para os primeiros 6 m^2 , acrescida de **60 VA** para cada **acréscimo de 4 m^2** inteiros além dos 6 m^2 .

Uma forma compacta de representar a regra, para $A > 6 \text{ m}^2$, é:

$$P_{\text{ilum}} = 100 + 60 \cdot \left\lfloor \frac{A - 6}{4} \right\rfloor \quad [\text{VA}]$$

onde $\lfloor \cdot \rfloor$ denota a parte inteira (isto é, considera-se apenas incrementos completos de 4 m^2).

Além da potência mínima, a norma também estabelece a necessidade de previsão de pelo menos **um ponto de luz fixo no teto** por cômodo ou dependência.

2.2.2 Tomadas de uso geral (TUG)

Para tomadas de uso geral, a ABNT NBR 5410 prescreve quantidades mínimas de pontos e potências mínimas a serem atribuídas, variando conforme o tipo de ambiente (??).

2.2.2.1 Banheiros

Deve ser previsto **no mínimo um ponto de tomada** próximo ao lavatório. Para efeito de previsão, adota-se **600 VA por tomada**.

2.2.2.2 Cozinhas, copas, áreas de serviço e locais semelhantes

Deve ser previsto **no mínimo um ponto de tomada para cada 3,5 m, ou fração, de perímetro**. Para atribuição de potência:

- **600 VA** por ponto, **até três pontos**;
- **100 VA** por ponto, para os **excedentes**.

2.2.2.3 Salas e dormitórios

Deve ser previsto **pelo menos um ponto de tomada para cada 5 m, ou fração, de perímetro**. Para previsão, adota-se **100 VA por tomada**.

2.2.2.4 *Demais cômodos e dependências*

Para outros ambientes:

- Área $\leq 6 \text{ m}^2$: **ao menos um ponto**;
- Área $> 6 \text{ m}^2$: **um ponto a cada 5 m, ou fração, de perímetro**.

Em ambos os casos, atribui-se **100 VA por tomada**.

2.2.3 *TUE e circuitos dedicados*

Além das TUG, a ABNT NBR 5410 estabelece que pontos destinados a alimentar, de modo exclusivo ou virtualmente dedicado, equipamentos com **corrente nominal superior a 10 A** devem constituir **circuito independente (??)**. Isso caracteriza as **tomadas de uso específico (TUE)**.

Essa prescrição reduz interferências e evita sobrecarga de circuitos de uso geral. Além disso, mesmo para equipamentos com corrente inferior a 10 A, pode ser recomendável (a critério do projetista) a adoção de circuitos exclusivos quando houver características específicas (motores, cargas sensíveis, uso contínuo), demonstrando que existe um espaço de **critério de projetista** para decidir quando a segregação é desejável.

2.3 **Divisão em circuitos terminais (NBR 5410 + boas práticas)**

Após a previsão das cargas, a instalação deve ser **dividida em circuitos terminais**. A ABNT NBR 5410 estabelece essa divisão como requisito para segurança, manutenção e redução de interferências.

2.3.1 *Separação entre iluminação e TUG*

Como diretriz geral e boa prática amplamente aceita, recomenda-se manter **circuitos de iluminação separados dos circuitos de tomadas**, evitando que falhas em cargas de tomadas provoquem desligamentos de iluminação. Essa segregação facilita também a manutenção e o diagnóstico de falhas.

2.3.2 *Exclusividade para cozinha, área de serviço e TUE*

A norma estabelece situações em que circuitos exclusivos são necessários:

- **TUE (Corrente > 10 A):** Devem constituir circuitos independentes.
- **Cozinhas, áreas de serviço e afins:** Os pontos de tomada desses ambientes devem ser atendidos por **circuitos exclusivamente destinados** a eles (??).

2.3.3 Limites típicos por circuito (boas práticas)

Embora a norma defina requisitos mínimos, é prática comum adotar limites de potência para evitar correntes elevadas em circuitos de uso geral e facilitar a proteção. No contexto deste trabalho, consideram-se como **boas práticas**:

- **Iluminação:** Limitar a potência para evitar desligamento de grandes áreas em caso de falha. Em 220 V, valores da ordem de 2500 VA são usuais.
- **TUG:** Limitar a potência total para manter correntes compatíveis com disjuntores de uso geral (ex.: 16 A ou 20 A). Em 220 V, limites da ordem de 4300 VA são referências comuns de projeto.

2.3.4 Circuitos de reserva

A ABNT NBR 5410 estabelece que os quadros de distribuição devem prever **capacidade de reserva** (espaço físico) para ampliações futuras (??). Na prática de projeto, isso se materializa prevendo **circuitos reserva** no quadro, dimensionados e deixados vagos para uso futuro. A quantidade de reservas depende do número de circuitos efetivos (ex.: para quadros com até 6 circuitos, prever no mínimo 2 reservas).

2.4 Dimensionamento de condutores e proteções (NBR 5410)

Uma vez definidos os circuitos, procede-se ao **dimensionamento dos condutores e à seleção dos dispositivos de proteção**.

2.4.1 Corrente de projeto, ampacidade e seção mínima

2.4.1.0.1 Corrente de projeto (I_B):

Calculada a partir da potência do circuito e da tensão ($I_B = S/V$).

2.4.1.0.2 Ampacidade (I_Z):

A capacidade de condução de corrente do condutor depende do método de instalação, material, isolamento e agrupamento. A seção deve ser tal que $I_Z \geq I_B$ (considerando fatores de correção).

2.4.1.0.3 Seção mínima:

A norma impõe seções mínimas por razões mecânicas, independentemente da corrente calculada:

- 1,5 mm² para iluminação;
- 2,5 mm² para circuitos de força (tomadas).

2.4.2 Critério de coordenação: $I_B \leq I_N \leq I_Z$

Para proteção contra sobrecarga, deve-se atender à relação fundamental de coordenação:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

onde I_B é a corrente de projeto, I_N é a corrente nominal do disjuntor e I_Z é a capacidade de condução do condutor nas condições instaladas. Isso garante que o disjuntor não dispare em operação normal ($I_B \leq I_N$) e que proteja o cabo antes que este sobreaqueça ($I_N \leq I_Z$).

2.4.3 Condutores de Proteção (PE) e Neutro

2.4.3.0.1 PE (Terra):

Prover caminho de baixa impedância para faltas. Sua seção é definida normativamente com base na seção do condutor de fase (geralmente igual até 16 mm²).

2.4.3.0.2 Neutro:

Condutor de retorno. Em circuitos monofásicos, sua seção é, em regra, igual à do condutor de fase.

2.4.4 Hipóteses adotadas no escopo (220 V, B1, PVC)

Para viabilizar a automatização determinística neste trabalho, são adotadas hipóteses de projeto usuais para residências de padrão popular/médio na região do estudo:

- Tensão de fase-neutro/fase-fase conforme concessionária (ex.: 220 V);
- Método de instalação **B1** (condutores em eletroduto embutido em alvenaria);
- Condutores de **Cobre** com isolamento **PVC** (70°C);
- Consideração típica de **3 condutores carregados** em agrupamentos iniciais (F+N ou F+F, agrupados), ajustável conforme o caso.

2.5 Tipo de fornecimento e diretrizes da concessionária (ET-124 / ENEL Ceará)

Além da NBR 5410, o projeto deve respeitar as normas da concessionária local (ET-124 da ENEL Ceará) (??).

2.5.1 Enquadramento do fornecimento pela potência instalada

A ET-124 define se o fornecimento será **monofásico, bifásico ou trifásico** com base na **potência instalada total** da unidade consumidora. A potência instalada é a soma das potências atribuídas a todas as cargas (iluminação, TUG e TUE). Faixas de potência (ex.: até 15 kW, até 25 kW) determinam o tipo de atendimento.

2.5.2 Impactos do tipo de fornecimento no projeto

O tipo de fornecimento afeta:

1. A arquitetura do quadro (monofásico vs. trifásico);
2. O padrão de entrada e medição;
3. A necessidade de **balanceamento de fases** na distribuição dos circuitos, visando equilibrar as cargas entre as fases disponíveis.

2.6 IA: Modelos de Linguagem (LLM)

2.6.1 *Conceito, capacidades e limitações*

Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs) são sistemas treinados para prever e gerar texto de forma coerente. Eles são capazes de interpretar linguagem natural, resumir informações e estruturar dados. Contudo, operam de forma probabilística.

2.6.2 *Por que LLM sozinho não serve para cálculo normativo*

O uso isolado de LLMs para engenharia apresenta riscos:

- **Alucinações:** Geração de informações incorretas com alta confiança;
- **Inconsistência:** Falta de repetibilidade nos cálculos;
- **Dificuldade matemática:** Erros em operações aritméticas complexas.

Para projetos elétricos, onde a segurança depende de valores exatos e conformidade normativa, essas limitações inviabilizam o uso do LLM como única "calculadora".

2.7 Agentes e uso de ferramentas

2.7.1 *Conceito de agente*

Um agente é um sistema que utiliza um LLM como cérebro para raciocinar, mas possui a capacidade de **agir** sobre o ambiente. Ele recebe um objetivo, planeja passos e executa ações.

2.7.2 *Ferramentas determinísticas para cálculos normativos*

Para mitigar as limitações dos LLMs, o agente utiliza **ferramentas determinísticas** (código convencional) para executar cálculos.

$$LLM \text{ (Interpretação/Texto)} + Ferramenta \text{ (Cálculo/Norma)} = Projeto \text{ Confiável.}$$

Isso garante que, para uma dada entrada, o dimensionamento (seções, disjuntores) siga rigorosamente a NBR 5410.

2.7.3 *Validação e coerência*

O sistema valida se os resultados das ferramentas fazem sentido técnico (ex.: disjuntor não pode ser maior que a ampacidade do cabo) e se estão coerentes com a descrição do usuário, garantindo um projeto seguro e auditável.

2.8 **Recuperação Aumentada por Busca (RAG) aplicada a normas**

2.8.1 *Justificativa para uso de RAG em normas*

Normas técnicas são extensas e detalhadas. O uso de RAG permite que o agente consulte trechos específicos da norma durante o processo, fundamentando suas decisões em texto real em vez de confiar apenas na memória de treinamento do modelo.

2.8.2 *Pipeline conceitual: indexação, recuperação e síntese*

1. **Indexação:** Fragmentação das normas em trechos consultáveis;
2. **Recuperação:** Busca híbrida (semântica + palavras-chave) por trechos relevantes ao contexto atual;
3. **Síntese:** O agente usa a informação recuperada para tomar decisões ou explicar o memorial.

2.9 **Síntese do capítulo**

Este capítulo estabeleceu a base para o desenvolvimento do sistema proposto. A amarração entre as **normas técnicas** (NBR 5410 e ET-124), que fornecem os critérios de engenharia, e a **arquitetura computacional** (Agentes, LLM e RAG), que provê a inteligência e flexibilidade, é o cerne da metodologia. A estratégia de separar o determinismo (cálculo) da fluidez (texto) é fundamental para garantir que o memorial de cálculo gerado seja, ao mesmo tempo, tecnicamente rigoroso e acessível ao usuário.

3 METODOLOGIA

Este trabalho utiliza três frentes principais para alcançar os resultados propostos: (i) um mecanismo de aquisição e consolidação de requisitos do projeto elétrico residencial, capaz de interagir com o usuário em linguagem natural e/ou interpretar uma planta baixa em formato de imagem; (ii) um conjunto de rotinas de dimensionamento fundamentadas em normas técnicas aplicáveis a instalações elétricas de baixa tensão e em diretrizes locais de fornecimento, responsáveis por transformar as informações do imóvel em cálculos e decisões de projeto; e (iii) um procedimento de verificação de conformidade com realimentação do processo, visando assegurar que o resultado final atenda aos critérios normativos e às boas práticas adotadas.

Além disso, o método foi estruturado para manter rastreabilidade ao longo da execução, por meio de uma representação estruturada do projeto (modelo da residência), que é atualizada progressivamente conforme novas informações são obtidas e conforme os cálculos são realizados. Essa abordagem permite organizar o processo em etapas claras, reduzir ambiguidades e apoiar a geração final do memorial de cálculo.

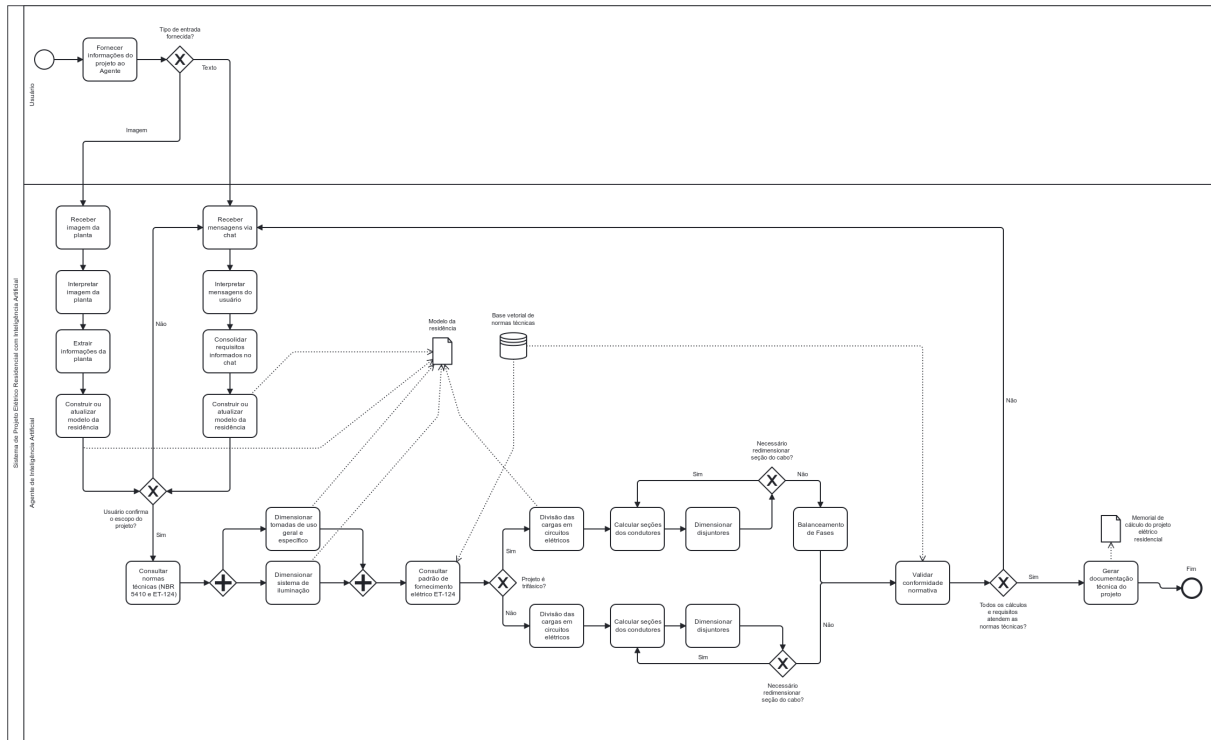
Neste capítulo, serão detalhadas as metodologias empregadas para (a) coletar e organizar as entradas do usuário, (b) construir o modelo do imóvel, (c) executar o pipeline de dimensionamento e (d) validar o atendimento às normas técnicas, culminando na geração do memorial de cálculo.

Solução proposta e visão geral do Fluxo

A Figura 1 apresenta o fluxo metodológico proposto neste trabalho, representado em formato processual. O processo se inicia com o fornecimento de informações pelo usuário ao agente, podendo ocorrer por dois caminhos de entrada: texto (conversação em linguagem natural) ou imagem da planta baixa.

No primeiro caminho, o usuário interage por mensagens, e as informações são interpretadas e consolidadas progressivamente, até que o escopo do projeto seja suficientemente definido. No segundo caminho, o usuário fornece uma planta baixa em formato de imagem contendo, preferencialmente, identificação dos ambientes e suas dimensões. A interpretação da planta busca extrair os dados geométricos necessários ao dimensionamento; quando a extração não é satisfatória, o fluxo prevê mecanismos auxiliares de extração e normalização das informações. Em ambos os casos, as informações obtidas alimentam a construção e atualização

Figura 1 – Fluxo metodológico do agente para projeto elétrico residencial



Fonte: Elaborado pelo autor

do modelo da residência, que representa os ambientes e as cargas previstas, incluindo cargas específicas informadas pelo usuário ao longo da interação.

Uma vez consolidado o modelo do imóvel, o fluxo avança para as etapas de dimensionamento fundamentadas nas normas técnicas e diretrizes de fornecimento adotadas. Nessa fase, são executados, de forma sequencial e coerente, os cálculos relacionados a iluminação, tomadas de uso geral, tomadas de uso específico, bem como a divisão da instalação em circuitos terminais, com base em critérios normativos e boas práticas de projeto. A partir da definição dos circuitos, o processo realiza o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção, priorizando critérios de capacidade de condução de corrente e coerência entre condutor e proteção. Para instalações alimentadas por mais de uma fase, o fluxo prevê ainda o balanceamento de cargas entre fases, buscando o maior equilíbrio possível.

O diagrama também contempla pontos de decisão e realimentação. Caso seja identificado que algum critério não foi atendido (por exemplo, necessidade de ajuste de dimensionamento), o processo retorna às etapas apropriadas para correção. Ao final, é executada uma etapa de validação de conformidade normativa, na qual se verifica se os resultados atendem aos requisitos aplicáveis e às boas práticas adotadas. Somente após a validação positiva o fluxo segue para a geração do memorial de cálculo e demais tabelas finais do projeto, encerrando o processo.

3.1 Aquisição das informações do projeto e consolidação do escopo

O funcionamento do método proposto depende, inicialmente, da aquisição e estruturação das informações do projeto elétrico residencial. Nesta etapa, o objetivo é transformar entradas não estruturadas (texto em linguagem natural e/ou imagem da planta) em um modelo de dados estruturado, contendo os parâmetros mínimos necessários para a execução dos dimensionamentos previstos no escopo do trabalho.

A aquisição das informações ocorre por dois caminhos: (i) interação conversacional e (ii) interpretação de planta baixa em formato de imagem. Em ambos os casos, o fluxo prevê mecanismos de confirmação e complementação, de modo que o escopo seja considerado “fechado” apenas quando o modelo do imóvel estiver completo o suficiente para dar início aos cálculos.

3.1.1 *Entrada por conversação em linguagem natural*

No modo conversacional, o usuário descreve características do imóvel e do fornecimento por meio de mensagens em linguagem natural. O sistema conduz uma sequência de perguntas e confirmações para reduzir ambiguidade e coletar informações essenciais. Essa abordagem é particularmente útil quando o usuário não possui a planta em imagem ou quando existem dados que não estão explicitamente presentes na planta.

As informações mínimas buscadas nessa etapa incluem:

- tensão de alimentação adotada no projeto;
- método de instalação considerado (assumindo-se um método padrão, quando não especificado, com possibilidade de alteração);
- parâmetros gerais de projeto, como hipóteses de agrupamento e organização de circuitos;
- cargas específicas (tomadas de uso específico), informadas pelo usuário, que impactam diretamente a divisão de circuitos e o dimensionamento.

À medida que o diálogo avança, as informações são registradas no modelo de dados do projeto. Quando o usuário menciona a existência de uma carga dedicada (por exemplo, um equipamento com alimentação específica em determinado ambiente), essa carga passa a compor explicitamente o modelo do imóvel e será tratada nas etapas posteriores.

3.1.2 *Entrada por imagem da planta baixa*

No modo de entrada por imagem, o usuário fornece uma planta baixa que contenha, preferencialmente, identificação dos ambientes e dimensões (comprimento e largura). A partir dessa entrada, o sistema realiza a interpretação da planta para extrair dados geométricos relevantes ao dimensionamento, como:

- lista de ambientes;
- dimensões dos ambientes;
- grandezas derivadas, como área e perímetro.

Quando a interpretação direta da imagem não é suficiente para extrair informações com qualidade, o método prevê um mecanismo auxiliar de extração textual como alternativa (fallback), permitindo recuperar rótulos e valores dimensionais presentes na planta. Em seguida, os dados extraídos são validados e normalizados antes de serem incorporados ao modelo do projeto.

Nesta versão do trabalho, a entrada por planta é limitada ao formato de imagem, sendo a extensão para outros formatos (por exemplo, arquivos CAD) considerada como possibilidade de trabalhos futuros.

3.1.3 *Estruturação do modelo do imóvel e regras de consistência*

Independentemente do canal de entrada, as informações coletadas são organizadas em um modelo estruturado do imóvel, composto, no mínimo, por:

- parâmetros de alimentação (como tensão);
- relação de ambientes (nome e dimensões);
- grandezas geométricas derivadas (área e perímetro);
- registro de cargas previstas por ambiente, incluindo cargas específicas informadas durante a interação.

Além de armazenar os dados, a metodologia aplica regras de consistência para evitar propagação de erros para as etapas de cálculo, tais como:

- verificação de dimensões válidas (valores positivos e coerentes);
- padronização de unidades e formatos numéricos;
- confirmação de informações sensíveis ao dimensionamento quando há ambiguidade (por exemplo, tensão de alimentação e presença de cargas dedicadas).

3.1.4 Critério de encerramento da etapa (escopo “fechado”)

Considera-se que o escopo está “fechado” quando o modelo do imóvel contém informações suficientes para iniciar o pipeline de dimensionamento, isto é:

1. parâmetros de alimentação definidos;
2. ambientes identificados com dimensões válidas;
3. cargas específicas relevantes registradas (quando existirem);
4. ausência de lacunas que comprometam a divisão em circuitos e o dimensionamento por critérios do escopo.

A partir desse ponto, o fluxo avança para as etapas de cálculo e validação normativa, mantendo a possibilidade de retorno à etapa de aquisição caso sejam identificadas inconsistências durante as verificações posteriores.

3.2 Modelo normativo e estratégia de aplicação

Com o escopo consolidado e o modelo do imóvel estruturado, o método avança para a etapa em que as informações coletadas são transformadas em decisões e cálculos do projeto elétrico residencial. Nesta fase, a metodologia adota como referência as normas técnicas aplicáveis a instalações elétricas de baixa tensão e as diretrizes locais de fornecimento, estabelecendo um conjunto de regras e critérios que guiam o dimensionamento, com base na ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

A estratégia adotada combina dois elementos complementares: (i) rotinas determinísticas de dimensionamento, que formalizam regras normativas em procedimentos reprodutíveis; e (ii) um mecanismo de consulta e fundamentação normativa, utilizado para justificar escolhas e responder dúvidas do usuário sobre o porquê de determinadas decisões.

Essa abordagem é relevante porque o dimensionamento elétrico possui partes estritamente normativas e calculáveis, que demandam consistência e repetibilidade, e também possui pontos em que o usuário necessita de esclarecimento técnico sobre critérios adotados e boas práticas.

3.2.1 Formalização das regras normativas

As regras extraídas dos documentos técnicos são organizadas em rotinas de cálculo e critérios de verificação. Sempre que uma regra puder ser expressa de forma objetiva (por exemplo,

cálculo de cargas mínimas, definição de limites por circuito, obrigatoriedade de circuitos exclusivos para determinadas cargas), ela é incorporada como procedimento determinístico. Dessa forma, o método garante que, para um mesmo conjunto de entradas, os resultados produzidos serão consistentes e auditáveis.

Quando houver necessidade de esclarecer decisões (por exemplo, justificar a separação de circuitos, explicar limites de potência adotados ou a razão de circuitos dedicados), o método utiliza a consulta a trechos normativos e diretrizes aplicáveis como suporte explicativo. Assim, a fundamentação técnica pode ser apresentada de forma transparente, sem comprometer a consistência do dimensionamento.

3.2.2 Organização do pipeline de dimensionamento

O dimensionamento é estruturado em etapas sequenciais, refletindo o fluxo de projeto e reduzindo dependências circulares. De forma geral, o pipeline é organizado como:

1. **Cálculo das cargas por ambiente:** determinação das cargas mínimas de iluminação e das cargas de tomadas de uso geral (TUG) por ambiente, conforme regras normativas para cada tipo de cômodo.
2. **Incorporação de cargas específicas (TUE):** registro de cargas informadas pelo usuário que devem receber tratamento dedicado no projeto.
3. **Divisão em circuitos terminais:** organização da instalação em circuitos de iluminação e circuitos de tomadas, com separação funcional e aplicação de critérios normativos e boas práticas para limitação de potência por circuito, quando necessário.
4. **Dimensionamento de condutores:** seleção da seção dos condutores por circuito, considerando como critério principal a capacidade de condução de corrente, dadas as premissas adotadas (material do condutor, tipo de isolamento, método de instalação e condições de referência).
5. **Dimensionamento dos dispositivos de proteção:** escolha dos dispositivos de proteção compatíveis com os circuitos dimensionados, preservando coerência técnica entre proteção e condutores.
6. **Balanceamento de fases (quando aplicável):** distribuição dos circuitos entre fases buscando equilíbrio de potência por fase, conforme boas práticas e diretrizes aplicáveis.
7. **Verificação de conformidade e ajustes:** checagem do atendimento às regras adotadas, com retorno às etapas anteriores quando necessário.

Cada uma dessas etapas produz saídas intermediárias que são armazenadas de forma estruturada, permitindo rastreabilidade e facilitando a geração do memorial de cálculo ao final do processo.

3.2.3 *Premissas e limites de escopo adotados*

Para tornar o método objetivo e reproduzível, foram adotadas premissas compatíveis com o contexto residencial, incluindo um método de instalação de referência e condições padrão para o dimensionamento por capacidade de condução de corrente. Nesta versão do trabalho, o dimensionamento é centrado em critérios diretamente aplicáveis às etapas de cálculo, divisão de circuitos, seleção de condutores e proteção, além do balanceamento quando pertinente.

Critérios adicionais, como verificação de queda de tensão, curto-circuito e aterramento, não são contemplados no escopo atual e são indicados como extensões futuras, sem prejuízo ao objetivo principal do trabalho.

3.3 Pipeline de dimensionamento do projeto elétrico

O dimensionamento do projeto elétrico residencial proposto neste trabalho é conduzido por um pipeline sequencial, fundamentado na previsão de cargas mínimas e na organização em circuitos terminais, conforme critérios normativos e boas práticas usuais. O levantamento das potências é realizado por meio de uma previsão das cargas mínimas de iluminação e tomadas, permitindo determinar a potência total prevista da instalação. Essa previsão segue o que estabelece o item 9.5.2 da ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), que orienta o procedimento de estimativa das cargas a serem instaladas.

3.3.1 *Previsão de carga de iluminação*

A carga mínima de iluminação por cômodo/dependência é estimada em função da área do ambiente, conforme o **item 9.5.2** da ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Para fins de aplicação metodológica, adota-se:

- Para ambientes com **área $\leq 6 \text{ m}^2$** : prever 100 VA de carga mínima de iluminação.
- Para ambientes com **área $> 6 \text{ m}^2$** : prever 100 VA para os primeiros 6 m^2 **acrescida de 60 VA a cada aumento de 4 m^2 inteiros.**

Essa regra permite que a carga mínima de iluminação seja calculada de forma

reprodutível a partir das dimensões do cômodo, gerando como saída: (i) potência de iluminação por ambiente e (ii) potência total de iluminação da residência.

Observação normativa: além da potência, a norma estabelece que, para cada cômodo ou dependência, deve ser previsto **pelo menos um ponto de luz fixo no teto**, comandado por interruptor, conforme o **subitem 9.5.2.1.1** da ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

3.3.2 *Precisão de tomadas de uso geral*

A previsão de TUG é realizada conforme o item 9.5.2 da ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), diferenciando-se por tipo de ambiente. Além disso, no caso de banheiros e demais situações com restrições, deve-se respeitar as condições de instalação indicadas no item 9.1 (restrições/zonas aplicáveis ao ambiente).

De forma resumida, a metodologia aplica:

- **Banheiros:** prever pelo menos **1 tomada** próxima ao lavatório, respeitando as restrições do **item 9.1**; atribuir **600 VA por tomada** (mínimo).
- **Cozinhas, copas, copas-cozinhas, áreas de serviço, lavanderias e locais semelhantes:** prever no mínimo **1 tomada a cada 3,5 m de perímetro** (ou fração); atribuir **600 VA por ponto para até 3 pontos e 100 VA por ponto excedente**, considerando cada ambiente separadamente.
- **Varandas:** prever pelo menos **1 tomada** (admitindo-se posição próxima ao acesso em situações construtivas específicas); atribuir **100 VA por tomada**.
- **Salas e dormitórios:** prever no mínimo **1 tomada a cada 5 m de perímetro** (ou fração); atribuir **100 VA por tomada**.
- **Demais cômodos/dependências:** se área $\leq 6 \text{ m}^2$, prever ao menos 1 tomada; se área $> 6 \text{ m}^2$, prever **1 tomada a cada 5 m de perímetro** (ou fração); atribuir **100 VA por tomada**.

Como saída dessa etapa, o método obtém a quantidade mínima de TUG por ambiente, a potência atribuída por ambiente e o total de TUG da instalação.

Com base nas regras de previsão de carga mínima de iluminação (item 9.5.2) e nas regras de TUG sintetizadas na Tabela 1 obtém-se a carga prevista de TUG por ambiente e a carga total de TUG da instalação, as quais são utilizadas nas etapas posteriores de divisão em circuitos terminais e dimensionamento.

Tabela 1 – Regras mínimas de previsão de TUG por tipo de ambiente e potência atribuída

Tipo de ambiente	Regra mínima de quantidade	Potência atribuída
Banheiros	Pelo menos 1 tomada próxima ao lavatório (ver item 9.1)	≥ 600 VA por tomada
Cozinhas, copas, áreas de serviço e semelhantes	1 tomada a cada 3,5 m de perímetro (ou fração), independente da área	600 VA até 3 pontos; 1
Varandas	Pelo menos 1 tomada (admite-se próxima ao acesso)	100 VA por tomada
Salas e dormitórios	1 tomada a cada 5 m de perímetro (ou fração), independente da área	100 VA por tomada
Demais cômodos	Área ≤ 6 m ² : 1 tomada; Área > 6 m ² : 1 a cada 5 m de perímetro	100 VA por tomada

Fonte: Adaptado de ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

3.3.3 Tomadas de uso específico - TUE e circuitos dedicados

As cargas específicas (TUE) são incorporadas ao modelo do projeto a partir das informações fornecidas pelo usuário (ex.: condicionador de ar, chuveiro elétrico, máquina de lavar). Conforme o **subitem 9.5.3.1** da ABNT NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), todo ponto de utilização previsto para alimentar equipamento de modo exclusivo ou virtualmente dedicado, com corrente nominal superior a 10 A, deve constituir um circuito independente.

Na prática metodológica, isso implica:

- **registrar cada TUE** com sua localização (ambiente) e característica de potência/corrente;
- **alocar cada TUE em circuito terminal próprio**, evitando compartilhamento com TUG;
- **permitir (por critério de projetista)** a criação de circuitos dedicados também para cargas com corrente inferior a 10 A quando houver justificativa técnica (por exemplo, natureza motriz ou sensibilidade eletrônica), mantendo coerência com a boa prática.

3.3.4 Divisão da instalação em circuitos terminais

Com as cargas mínimas de iluminação e TUG calculadas e as TUE consolidadas, realiza-se a divisão da instalação em circuitos terminais. Essa divisão visa facilitar operação e manutenção, permitir seccionamento adequado e reduzir interferência entre pontos de utilização.

A metodologia aplica:

- (a) **Separação funcional:** circuitos de **iluminação** devem ser separados de circuitos de **tomadas de uso geral** (boa prática consistente com projetos residenciais).

- (b) **Circuitos exclusivos para TUE (subitem 9.5.3.1):** TUE alocadas em circuitos independentes quando aplicável (corrente nominal > 10 A ou carga dedicada/virtualmente dedicada).
- (c) **Tomadas de cozinhas e áreas semelhantes (item 9.5.3.2):** os pontos de tomada de cozinhas, copas-cozinhas, áreas de serviço, lavanderias e locais semelhantes devem ser atendidos por circuitos destinados **exclusivamente** às tomadas desses locais.
- (d) **Limitação de potência por circuito:** para manter o projeto coerente com faixas usuais de proteção, adota-se a limitação de potência como boa prática:
 - **Iluminação:** limitar a potência por circuito conforme prática didática e valores de referência por tensão.
 - **TUG:** limitar a potência por circuito considerando a capacidade dos dispositivos de proteção e condutores.

Nota: Quando a potência total se mantém abaixo dos limites de referência, admite-se manter um único circuito, respeitadas as separações funcionais.
- (e) **Distribuição entre fases:** em instalações bifásicas ou trifásicas, as cargas devem ser distribuídas buscando o maior equilíbrio possível entre as fases.

3.3.5 *Previsão de circuitos reserva*

O método prevê reserva para ampliações futuras sob dois aspectos complementares:

- reserva física no quadro de distribuição (espaço para inclusão de disjuntores/circuitos);
- reserva de potência associada a circuitos típicos (valores usuais adotados por critério de projetista em práticas acadêmicas e profissionais).

3.3.6 *Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção*

Após a definição dos circuitos terminais, estima-se a corrente por circuito a partir da potência atribuída e da tensão do projeto. Em seguida:

- dimensionam-se os condutores pelo critério principal de capacidade de condução de corrente (ampacidade), adotando premissas usuais do escopo (material e isolamento usuais, método de instalação de referência e condições padrão);
- selecionam-se os dispositivos de proteção coerentes com o circuito dimensionado, assegurando compatibilidade entre proteção e condutor.

3.3.7 Balanceamento de fases

Quando aplicável, o balanceamento é realizado visando equilibrar a potência por fase, distribuindo circuitos de modo a reduzir assimetrias. Circuitos dedicados (TUE) são tratados como elementos prioritários, a fim de evitar repartições inadequadas e preservar a lógica funcional do projeto.

3.3.8 Verificação final e retorno para correções

Ao final do pipeline, verifica-se o atendimento às regras normativas citadas (itens 9.5.2, 9.5.2.1.1, 9.1, 9.5.3.1 e 9.5.3.2) e às boas práticas adotadas. Caso alguma inconsistência seja detectada (por exemplo, circuito excedendo limite de potência de referência ou TUE não dedicada), o fluxo retorna à etapa pertinente (divisão de circuitos ou dimensionamento), até que o conjunto final esteja coerente para geração do memorial.

3.4 Geração do memorial de cálculo e organização da documentação do projeto

Concluídas as etapas de previsão de cargas, divisão em circuitos terminais e dimensionamento, os resultados são consolidados em um memorial de cálculo. Esse documento tem por finalidade registrar, de forma organizada e rastreável, as premissas adotadas, os critérios normativos utilizados e os principais resultados obtidos, permitindo verificação técnica e comunicação clara do projeto.

O memorial gerado segue uma estrutura padronizada, organizada em seções que refletem diretamente o pipeline descrito na Seção 3.3, garantindo coerência entre: (i) informações de entrada, (ii) resultados intermediários e (iii) dimensionamento final.

3.4.1 Organização do memorial

O memorial é composto, de modo geral, pelas seguintes seções:

1. Dados da obra

Identificação da edificação, localização, tipo de uso e dados básicos do projeto. Essa seção também inclui campos para identificação do(s) projetista(s) e informações de fornecimento quando aplicável.

2. Objetivos e escopo do memorial

Apresenta o objetivo do documento e delimita o escopo do projeto gerado, tipicamente incluindo:

- definição e quantificação de cargas por ambiente;
- cálculo da potência instalada prevista;
- divisão em circuitos terminais;
- dimensionamento de condutores e especificação das proteções;
- diretrizes de organização do quadro e registros necessários para execução.

3. Metodologia aplicada no memorial

Resume os critérios adotados para levantamento de cargas e dimensionamento, com referência direta aos itens normativos que fundamentam as regras aplicadas. Em especial:

- previsão de cargas mínimas de iluminação e tomadas conforme ABNT NBR 5410 (item 9.5.2);
- obrigatoriedade de ponto de luz fixo por ambiente conforme subitem 9.5.2.1.1;
- regras de TUG por tipo de ambiente, com observação de restrições de instalação em ambientes específicos conforme item 9.1 quando aplicável;
- critério de circuitos dedicados para TUE conforme subitem 9.5.3.1;
- necessidade de circuitos exclusivos para tomadas de cozinhas/áreas similares conforme item 9.5.3.2;
- critérios de dimensionamento de condutores por capacidade de condução de corrente e seções mínimas, conforme os itens aplicáveis da ABNT NBR 5410.

4. Levantamento de cargas (por ambiente)

Apresenta tabelas por dependência com: área, perímetro, quantidade de pontos e potência mínima prevista para:

- iluminação (com base no item 9.5.2);
- TUG (com base no item 9.5.2 e restrições do item 9.1 quando aplicável);
- TUE (quando houver), registrando a carga nominal informada para cada equipamento.

Ao final, o memorial consolida um quadro-resumo de cargas e a potência total prevista.

5. Divisão dos circuitos terminais

Documenta a etapa de agrupamento das cargas em circuitos, explicitando:

- separação entre iluminação e tomadas;
- criação de circuitos exclusivos para TUE (subitem 9.5.3.1);
- circuitos exclusivos para cozinhas/áreas similares (item 9.5.3.2);

- aplicação de limites de potência por circuito como boa prática;
- registro de circuitos reserva.

6. Padrão de fornecimento e dimensionamento da entrada/proteção geral

Com base na potência instalada prevista e nos critérios aplicáveis da concessionária local, registra: tipo de fornecimento (monofásico/bifásico/trifásico), proteção geral e seção mínima do condutor de entrada.

7. Balanceamento de cargas (quando aplicável)

Apresenta a distribuição dos circuitos e um resumo das potências por fase, buscando o equilíbrio de potência.

8. Dimensionamento dos condutores

Apresenta o dimensionamento por circuito contendo: potência, tensão, corrente de projeto e seção final selecionada, incluindo condutores neutro e de proteção.

9. Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Documenta a seleção do dispositivo de proteção por circuito, registrando o critério de coordenação entre corrente de projeto, corrente nominal do dispositivo e capacidade do condutor através das inequações normativas.

10. Resumo consolidado

Consolida em tabelas finais: resumo por dependência, resumo por circuito, tabela completa de dimensionamento e resumo do fornecimento geral.

3.4.2 Rastreabilidade entre método e documento

A estrutura do memorial é construída para manter correspondência direta com o pipeline descrito na Seção 3.3. Assim, cada tabela do memorial deriva de uma etapa do método (cargas → circuitos → condutores → proteções → fornecimento/balanceamento), permitindo auditoria e verificação dos resultados obtidos.

3.5 Estratégia de validação da metodologia

A validação da metodologia proposta foi conduzida por meio de um estudo de caso, no qual os resultados gerados pelo método foram comparados com referências acadêmicas consolidadas no contexto de instalações elétricas residenciais. O objetivo dessa validação é verificar se as saídas produzidas, tais como previsão de cargas mínimas, divisão em circuitos

terminais, dimensionamento de condutores, seleção de dispositivos de proteção e, quando aplicável, balanceamento de fases, permanecem coerentes com os critérios normativos e com práticas de projeto utilizadas no ensino de engenharia elétrica.

3.5.1 Base de referência e dados utilizados

Como referência principal, foi adotado um projeto elétrico residencial disponibilizado em contexto didático no curso de instalações elétricas residenciais da Universidade Federal do Ceará (UFC) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2023), que inclui enunciado do projeto, solução de referência (gabarito do docente) e soluções típicas produzidas por discentes. Essa escolha se justifica por se tratar de material estruturado com finalidade pedagógica e alinhado às exigências normativas, permitindo uma comparação objetiva entre o resultado esperado e o resultado obtido pela metodologia.

A entrada do estudo de caso foi composta pelas informações essenciais do imóvel (ambientes e dimensões) e pelos parâmetros de fornecimento e premissas usuais de projeto (por exemplo, tensão e condições de instalação de referência), de modo a reproduzir condições equivalentes às utilizadas no exercício acadêmico.

3.5.2 Critérios de avaliação e equivalência aceitável

A comparação entre os resultados foi feita considerando dois níveis:

1. Conformidade normativa: verificação do atendimento aos requisitos e critérios prescritos na ABNT NBR 5410 aplicáveis às etapas contempladas no escopo do trabalho, incluindo a previsão de cargas mínimas, regras de pontos de tomada e pontos de iluminação, e requisitos de circuitos dedicados e separação funcional.
2. Equivalência de projeto (critério de projetista): reconhecimento de que, mesmo com atendimento normativo, podem existir variações legítimas de projeto. Assim, foram considerados equivalentes resultados que, embora não idênticos em todos os detalhes ao gabarito, permanecem tecnicamente aceitáveis.

Esse critério é relevante especialmente na divisão de circuitos, onde diferentes agrupamentos podem ser adotados sem violar requisitos, desde que sejam respeitadas as regras de separação, exclusividade quando exigida e limites de potência/corrente aplicáveis.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3 em três estudos de caso provenientes de manuais e roteiros de laboratório utilizados em disciplinas de engenharia elétrica na Universidade Federal do Ceará. Para cada estudo de caso, a entrada é composta pela planta arquitetônica com as dimensões dos ambientes, a partir da qual são realizadas as etapas de: (i) previsão de cargas mínimas por ambiente, (ii) consolidação das cargas e divisão em circuitos terminais, (iii) dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção e (iv) determinação do tipo de fornecimento e, quando aplicável, balanceamento de cargas.

Os resultados obtidos foram avaliados por comparação com materiais de referência do contexto didático (respostas desenvolvidas manualmente, soluções típicas de discentes e gabarito), adotando-se como critério principal a reprodutibilidade das cargas mínimas por ambiente e a determinação do tipo de fornecimento. Adicionalmente, foram analisadas a coerência da divisão de circuitos e dos dimensionamentos correlatos (seções de condutores e disjuntores), reconhecendo-se que essas escolhas podem admitir variações decorrentes de critérios de projeto e premissas de instalação, desde que preservados os requisitos técnicos aplicáveis.

4.1 Estudos de caso e dados de entrada

A validação foi conduzida por meio de três exercícios extraídos de manuais e procedimentos de laboratório de disciplinas relacionadas a instalações elétricas, nos quais é proposto o desenvolvimento completo do projeto elétrico residencial a partir da planta e de requisitos mínimos. Os três estudos de caso são compostos por residências/apartamentos com distribuição típica de ambientes, possibilitando avaliar a metodologia em cenários de complexidade crescente.

4.1.1 Estudo de caso 1

O primeiro estudo de caso corresponde a uma residência composta por quatro dependências: cozinha, banheiro, sala e quarto. As dimensões de cada ambiente são apresentadas na Tabela 2

Tabela 2 – Dimensões, áreas e perímetros dos ambientes do projeto

Ambiente	Dimensões (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)
Cozinha	4,00 × 3,15	12,6	14,3
Sala	4,00 × 3,00	12,0	14,0
WC	2,70 × 2,00	5,4	9,4
Quarto	3,00 × 3,25	9,75	12,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.2 Estudo de caso 2

O segundo estudo de caso corresponde a um apartamento composto por cozinha, sala, quarto, banheiro e uma área de circulação. As dimensões são apresentadas na Tabela 3

Tabela 3 – Ambientes e dimensões do Estudo de Caso 2

Ambiente	Dimensões (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)
Cozinha	7,00 × 3,00	21,00	20,00
Sala	4,50 × 3,00	13,50	15,00
Quarto	4,50 × 3,00	13,50	15,00
Banheiro	3,00 × 3,00	9,00	12,00
Circulação	1,00 × 6,00	6,00	14,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.3 Estudo de caso 3

O terceiro estudo de caso corresponde a um apartamento com maior quantidade de dependências, incluindo área de serviço, cozinha, dois dormitórios, banheiro, copa e sala. As dimensões são apresentadas na Tabela 4

Tabela 4 – Ambientes e dimensões do Estudo de Caso 3

Ambiente	Dimensões (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)
Área de serviço	1,75 × 3,40	5,95	10,30
Cozinha	3,05 × 3,75	11,44	13,60
Dormitório 1	3,40 × 3,25	11,05	13,30
Dormitório 2	3,40 × 3,15	10,71	13,10
Banheiro	2,30 × 1,80	4,14	8,20
Copa	3,05 × 3,10	9,46	12,30
Sala	3,05 × 3,25	9,91	12,60

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.4 Premissas gerais adotadas nos três estudos de caso

Para garantir comparabilidade, foram adotadas premissas comuns aos três casos:

- Tensão nominal: 220 V.
- Tomadas de uso específico (TUE): não foram consideradas nos três exercícios, por se tratar de escopo alinhado ao manual de práticas; entretanto, o método prevê a inclusão desse tipo de carga quando necessário.
- Condições de instalação para dimensionamento: método de referência B1 (condutores em eletroduto embutido), condutores de cobre com isolamento em PVC e hipótese de agrupamento máximo de três circuitos como premissa padrão de projeto.
- Tipo de fornecimento: determinado a partir da potência instalada e das diretrizes da concessionária local, podendo resultar em alimentação monofásica, bifásica ou trifásica conforme o caso.

4.2 Previsão de cargas mínimas por ambiente

Nesta seção são apresentados os resultados do levantamento das cargas mínimas de iluminação e tomadas de uso geral (TUG) para os três estudos de caso descritos na Seção 4.1. A previsão de cargas seguiu os critérios normativos para determinação de potências mínimas por ambiente, permitindo consolidar a potência prevista e servir de base para a divisão em circuitos terminais e dimensionamentos subsequentes.

Ressalta-se que não foram consideradas cargas de tomadas de uso específico (TUE) nos três estudos por se tratarem de exercícios didáticos de manual. Ainda assim, a metodologia prevê a inclusão de TUE quando identificadas na entrada ou informadas pelo usuário.

4.2.1 Estudo de caso 1

Tabela 5 – Cargas mínimas de iluminação (Estudo de caso 1)

Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Nº de pontos	Potência total (VA)
Cozinha	12,60	14,30	2	160
WC	5,40	9,40	1	100
Sala	12,00	14,00	2	160
Quarto	9,75	12,50	1	100
Total			6	520

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 6 – Cargas mínimas de TUG (Estudo de caso 1)

Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Nº TUG 100 VA	Nº TUG 600 VA	Potência total (VA)
Cozinha	12,60	14,30	2	3	2000
WC	5,40	9,40	0	1	600
Sala	12,00	14,00	3	0	300
Quarto	9,75	12,50	3	0	300
Total			8	4	3200

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.2 Estudo de caso 2

Tabela 7 – Cargas mínimas de iluminação (Estudo de caso 2)

Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Nº de pontos	Potência total (VA)
Cozinha	21,00	20,00	4	280
Sala	13,50	15,00	2	160
Quarto	13,50	15,00	2	160
WC	9,00	12,00	1	100
Circulação	6,00	14,00	1	100
Total			10	800

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 8 – Cargas mínimas de TUG (Estudo de caso 2)

Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Nº TUG 100 VA	Nº TUG 600 VA	Potência total (VA)
Cozinha	21,00	20,00	3	3	2100
Sala	13,50	15,00	3	0	300
Quarto	13,50	15,00	3	0	300
WC	9,00	12,00	0	1	600
Circulação	6,00	14,00	1	0	100
Total			10	4	3400

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 9 – Cargas mínimas de iluminação (Estudo de caso 3)

Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Nº de pontos	Potência total (VA)
Área de serviço	5,95	10,30	1	100
Dormitório 2	10,71	13,10	2	160
Banheiro	4,14	8,20	1	100
Dormitório 1	11,05	13,30	2	160
Cozinha	11,44	13,60	2	160
Copa	9,46	12,30	1	100
Sala	9,91	12,60	1	100
Total			10	880

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 10 – Cargas mínimas de TUG (Estudo de caso 3)

Dependência	Área (m ²)	Perímetro (m)	Nº TUG 100 VA	Nº TUG 600 VA	Potência total (VA)
Área de serviço	5,95	10,30	1	0	100
Dormitório 2	10,71	13,10	3	0	300
Banheiro	4,14	8,20	0	1	600
Dormitório 1	11,05	13,30	3	0	300
Cozinha	11,44	13,60	1	3	1900
Copa	9,46	12,30	1	3	1900
Sala	9,91	12,60	3	0	300
Total			12	7	5400

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.3 Estudo de caso 3

4.3 Divisão em circuitos terminais

A partir das cargas previstas na Seção 4.2, as cargas foram agrupadas e distribuídas em circuitos terminais. Em todos os casos, foi mantida a separação entre circuitos de iluminação e circuitos de tomadas. Adicionalmente, foram previstos circuitos reserva no quadro de distribuição, seguindo prática usual de projeto para acomodar ampliações futuras.

Tabela 11 – Divisão em circuitos (Estudo de caso 1)

Circuito	Tipo	Dependências	Descrição	Potência (VA)	FP	Potência (W)
1	Iluminação	Cozinha, Sala, WC, Quarto	Iluminação geral	520	1,00	520
2	TUG	Cozinha	TUGs Cozinha	2000	0,80	1600
3	TUG	WC, Sala, Quarto	TUGs agrupadas	1200	0,80	960
4	Reserva	–	Circuito reserva 1	2200	1,00	2200
5	Reserva	–	Circuito reserva 2	2200	1,00	2200
Total				8120		7480

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 12 – Divisão em circuitos (Estudo de caso 2)

Circuito	Tipo	Dependências	Descrição	Potência (VA)	FP	Potência (W)
1	Iluminação	Cozinha, Sala, Quarto, WC, Circulação	Iluminação geral	800	1,00	800
2	TUG	Cozinha	TUGs Cozinha	2100	0,80	1680
3	TUG	WC, Sala, Quarto, Circulação	TUGs agrupadas	1300	0,80	1040
4	Reserva	–	Circuito reserva 1	2200	1,00	2200
5	Reserva	–	Circuito reserva 2	2200	1,00	2200
Total				8600		7920

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 13 – Divisão em circuitos (Estudo de caso 3)

Circuito	Tipo	Dependências	Descrição	Potência (VA)	FP	Potência (W)
1	Iluminação	Todos os ambientes	Iluminação geral	880	1,00	880
2	TUG	Área de serviço	TUGs área de serviço	100	0,80	80
3	TUG	Cozinha	TUGs cozinha	1900	0,80	1520
4	TUG	Copa	TUGs copa	1900	0,80	1520
5	TUG	Banheiro, Dorm. 1, Dorm. 2, Sala	TUGs agrupadas	1500	0,80	1200
6	Reserva	–	Circuito reserva 1	2200	1,00	2200
7	Reserva	–	Circuito reserva 2	2200	1,00	2200
Total				10680		9600

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.1 *Estudo de caso 1*

4.3.2 *Estudo de caso 2*

4.3.3 *Estudo de caso 3*

4.4 Dimensionamento dos circuitos

Após a divisão da instalação em circuitos terminais (Seção 4.3), procedeu-se ao dimensionamento elétrico de cada circuito, contemplando: (i) determinação da corrente de projeto, (ii) seleção da seção dos condutores de fase, neutro e proteção, e (iii) seleção do dispositivo de proteção (disjuntor) segundo os critérios usuais de coordenação entre corrente do circuito, capacidade de condução do condutor e corrente nominal do dispositivo.

Em todos os estudos de caso, adotaram-se as seguintes premissas: tensão nominal de 220 V, condutores de cobre com isolamento em PVC e método de instalação compatível com o método de referência utilizado na metodologia. A corrente de projeto de cada circuito foi obtida a partir da potência ativa atribuída e da tensão do circuito. Em seguida, a seção dos condutores foi definida garantindo atendimento simultâneo a: (a) seção mínima aplicável ao tipo de circuito e (b) capacidade de condução de corrente do condutor. Por fim, o disjuntor foi selecionado de modo a atender a condição de coordenação do tipo:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

onde I_B representa a corrente de projeto do circuito, I_N a corrente nominal do dispositivo de proteção e I_Z a capacidade de condução de corrente do condutor no método de instalação adotado.

Tabela 14 – Seções dos condutores (Estudo de caso 1)

Circuito	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Fase (mm ²)	Neutro (mm ²)	Proteção (mm ²)
C01	520,0	220	2,4	1,5	1,5	1,5
C02	1600,0	220	9,1	2,5	2,5	2,5
C03	960,0	220	5,5	2,5	2,5	2,5
C04	2200,0	220	10,0	2,5	2,5	2,5
C05	2200,0	220	10,0	2,5	2,5	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 15 – Dimensionamento dos disjuntores (Estudo de caso 1)

Circuito	I_B (A)	I_Z (A)	I_N (A)	Seção (mm ²)	Redimensionado
C01	2,4	17,5	3	1,5	Não
C02	9,1	24	10	2,5	Não
C03	5,5	24	6	2,5	Não
C04	10,0	24	10	2,5	Não
C05	10,0	24	10	2,5	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 16 – Seções dos condutores (Estudo de caso 2)

Circuito	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Fase (mm ²)	Neutro (mm ²)	Proteção (mm ²)
C01	800,0	220	3,6	1,5	1,5	1,5
C02	1680,0	220	9,5	2,5	2,5	2,5
C03	1040,0	220	5,9	2,5	2,5	2,5
C04	2200,0	220	10,0	2,5	2,5	2,5
C05	2200,0	220	10,0	2,5	2,5	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 17 – Dimensionamento dos disjuntores (Estudo de caso 2)

Circuito	I_B (A)	I_Z (A)	I_N (A)	Seção (mm ²)	Redimensionado
C01	3,6	17,5	6	1,5	Não
C02	9,5	24	10	2,5	Não
C03	5,9	24	6	2,5	Não
C04	10,0	24	10	2,5	Não
C05	10,0	24	10	2,5	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 18 – Seções dos condutores (Estudo de caso 3)

Circuito	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Fase (mm ²)	Neutro (mm ²)	Proteção (mm ²)
C01	880,0	220	4,0	1,5	1,5	1,5
C02	80,0	220	0,5	2,5	2,5	2,5
C03	1520,0	220	8,6	2,5	2,5	2,5
C04	1520,0	220	8,6	2,5	2,5	2,5
C05	1200,0	220	6,8	2,5	2,5	2,5
C06	2200,0	220	10,0	2,5	2,5	2,5
C07	2200,0	220	10,0	2,5	2,5	2,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 19 – Dimensionamento dos disjuntores (Estudo de caso 3)

Circuito	I_B (A)	I_Z (A)	I_N (A)	Seção (mm ²)	Redimensionado
C01	4,0	17,5	6	1,5	Não
C02	0,5	24	3	2,5	Não
C03	8,6	24	10	2,5	Não
C04	8,6	24	10	2,5	Não
C05	6,8	24	8	2,5	Não
C06	10,0	24	10	2,5	Não
C07	10,0	24	10	2,5	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4.1 Estudo de caso 1

4.4.2 Estudo de caso 2

4.4.3 Estudo de caso 3

4.5 Determinação do tipo de fornecimento e proteção geral

Com base na potência instalada obtida após a divisão dos circuitos e conforme diretrizes aplicáveis da concessionária local, foi determinado o tipo de fornecimento e especificada a proteção geral, incluindo a seção mínima do condutor de alimentação e o disjuntor geral.

Tabela 20 – Tipo de fornecimento e proteção geral (síntese)

Estudo de caso	Potência instalada (kW)	Tipo de fornecimento	Condutor mínimo (mm ²)	Disjuntor geral (A)
Caso 1	7,48	Monofásico	4,0	32
Caso 2	7,92	Monofásico	4,0	32
Caso 3	9,60	Monofásico	6,0	40

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.6 Síntese comparativa dos estudos de caso

A Tabela 21 apresenta uma visão consolidada dos principais resultados obtidos, evidenciando a progressão de carga e complexidade entre os cenários.

Tabela 21 – Comparativo geral dos estudos de caso

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Potência de iluminação total (VA)	520	800	880
Potência TUG total (VA)	3200	3400	5400
Potência instalada total (kW)	7,48	7,92	9,60
Nº de circuitos (ativos/total)	3 / 5	3 / 5	5 / 7
Tipo de fornecimento	Monofásico	Monofásico	Monofásico
Disjuntor geral (A)	32	32	40

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.7 Discussão e validação dos resultados

A validação foi conduzida comparando os resultados obtidos com as soluções desenvolvidas manualmente e com o gabarito associado aos exercícios dos manuais de laboratório. Como critérios principais de validação, foram priorizados dois indicadores fundamentais:

1. **Invariantes normativas:** as cargas mínimas por ambiente (iluminação e TUG) são determinadas por critérios normativos objetivos baseados em área, perímetro e classificação do ambiente. Portanto, para uma mesma planta de entrada, esses valores devem ser invariantes. Do mesmo modo, o tipo de fornecimento é uma função direta da potência instalada acumulada e das normas da concessionária local. A convergência total observada nesses itens (Tabela 22) valida a precisão do motor de cálculo em relação às regras de projeto.
2. **Coerência elétrica do dimensionamento:** a integridade técnica da solução foi verificada pela manutenção da condição de coordenação $I_B \leq I_N \leq I_Z$ em todos os circuitos. Observou-se que, para o conjunto de cargas e premissas adotadas, não houve necessidade de redimensionamento de condutores por critério de proteção (coluna "Redimensionado" nas tabelas de disjuntores), indicando que a seleção inicial baseada na capacidade de condução foi suficiente e consistente com as proteções de mercado selecionadas. Ressalta-se que, mesmo em circuitos com correntes muito reduzidas (como o C02 do Estudo de caso 3, com

apenas 0,5 A), a seção dos condutores foi mantida em conformidade com os requisitos de seção mínima normativa para circuitos de força e por critérios de padronização de projeto.

Em todos os três estudos de caso, observou-se concordância integral entre as cargas mínimas por ambiente calculadas e as referências (gabarito e soluções manuais). Do mesmo modo, o tipo de fornecimento identificado foi equivalente ao esperado no material de referência para o conjunto de premissas adotadas.

Foram observadas divergências pontuais ao comparar com soluções de alguns discentes, principalmente quando estes optaram por incluir cargas adicionais (por exemplo, considerar a presença de alguma TUE), o que pode elevar a potência instalada e, conseqüentemente, alterar o tipo de fornecimento. Contudo, esse comportamento não caracteriza inconsistência do método, mas sim diferença de escopo: quando o conjunto de cargas consideradas é alterado, é esperado que as etapas subsequentes do projeto (circuitos, dimensionamentos e fornecimento) sejam impactadas. No recorte de validação adotado, isto é, cargas mínimas normativas conforme o manual, os resultados permaneceram consistentes.

Tabela 22 – Resultado da validação (síntese)

Estudo de caso	Cargas mínimas por ambiente	Tipo de fornecimento	Observações
Caso 1	Convergência total	Convergência total	Divergências em soluções de terceiros associadas a inclusão de cargas adicionais
Caso 2	Convergência total	Convergência total	Mesmo comportamento observado
Caso 3	Convergência total	Convergência total	Mesmo comportamento observado

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um agente de inteligência artificial, baseado em modelos de linguagem, capaz de auxiliar a elaboração de projetos elétricos residenciais de baixa tensão a partir de informações fornecidas pelo usuário, seja por conversação em linguagem natural, seja por interpretação de planta baixa em formato de imagem. A proposta integrou técnicas de consulta a documentos normativos para fundamentação técnica e um conjunto de rotinas determinísticas para garantir consistência dos resultados, culminando na geração automática de um memorial de cálculo inicial do projeto.

Conforme apresentado no Capítulo 3, o método foi organizado como um pipeline de etapas bem definidas: aquisição e consolidação do escopo, previsão de cargas mínimas por ambiente, divisão em circuitos terminais, dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção, determinação do tipo de fornecimento e verificação de coerência técnica do dimensionamento. A abordagem determinística aplicada às etapas de cálculo garante reprodutibilidade: para um mesmo conjunto de entradas, os resultados permanecem invariantes, o que é essencial em tarefas guiadas por critérios normativos.

Os resultados do Capítulo 4 demonstraram que, nos três estudos de caso avaliados a partir de materiais didáticos de laboratório, as cargas mínimas por ambiente foram reproduzidas com concordância integral em relação às referências utilizadas (soluções manuais e gabaritos). Adicionalmente, observou-se convergência no tipo de fornecimento obtido para as premissas adotadas, com divergências pontuais apenas quando comparado a soluções de terceiros que assumiram escopos distintos (por exemplo, inclusão de tomadas de uso específico não previstas no enunciado). Ainda, a integridade elétrica do dimensionamento foi verificada pela manutenção da condição de coordenação entre corrente de projeto, dispositivo de proteção e capacidade de condução do condutor, sem necessidade de redimensionamentos no conjunto de casos analisados.

Do ponto de vista prático, o principal achado é que a aplicação de um agente com regras de cálculo determinísticas e suporte por documentação normativa pode reduzir significativamente o esforço inicial do projetista, oferecendo em curto intervalo de tempo um memorial de cálculo consistente como ponto de partida. Assim, a contribuição do trabalho se posiciona como uma ferramenta de apoio ao processo de projeto: o agente não substitui a responsabilidade técnica do profissional, mas entrega rapidamente uma base estruturada e

verificável, sobre a qual o engenheiro pode evoluir decisões de projeto e detalhes adicionais.

5.2 Contribuições do trabalho

As principais contribuições deste trabalho podem ser sintetizadas como:

- Proposição e implementação de um fluxo metodológico completo para projeto elétrico residencial de baixa tensão, organizado em etapas rastreáveis e alinhadas ao processo técnico de dimensionamento.
- Integração entre um mecanismo de interação (texto e imagem) e rotinas determinísticas de cálculo, assegurando consistência e repetibilidade dos resultados nas etapas normativas do projeto.
- Geração automática de um memorial de cálculo inicial, consolidando critérios adotados, tabelas e resultados do projeto, de forma estruturada e adequada ao uso como ponto de partida técnico.
- Validação em estudos de caso provenientes de contexto didático, com comparação a referências consolidadas, evidenciando conformidade nos itens invariantes normativos e coerência no dimensionamento elétrico resultante.

5.3 Limitações

Apesar dos resultados obtidos, o trabalho apresenta limitações decorrentes do recorte de escopo e das premissas adotadas nesta versão:

- **Escopo técnico parcial do projeto:** a metodologia priorizou as etapas centrais de previsão de cargas, divisão de circuitos, dimensionamento de condutores e proteção e determinação do tipo de fornecimento. Verificações típicas de projeto completo, como queda de tensão, curto-circuito, aterramento, dispositivos diferenciais residuais (DR), seletividade e coordenação com DPS, não foram contempladas nesta versão.
- **Premissas de projeto padronizadas:** foram adotados parâmetros usuais e simplificadores para viabilizar reprodutibilidade, tais como tensão nominal de 220 V, condições de instalação de referência e hipóteses padrão de agrupamento. Embora adequadas ao objetivo do trabalho, tais premissas podem não representar a totalidade de cenários encontrados em projetos reais.
- **Dependência de qualidade da entrada por imagem:** a interpretação de planta baixa

em formato de imagem depende de condições mínimas de legibilidade (qualidade da foto, resolução, presença de rótulos e dimensões), o que limita a robustez em situações com ruído, baixa iluminação ou ausência de informações explícitas.

- **Diretrizes locais e generalização:** a determinação do tipo de fornecimento foi tratada a partir de diretrizes aplicáveis ao contexto local considerado, de modo que a adaptação para outras concessionárias e regiões requer parametrização adicional.
- **Validação em contexto didático:** a avaliação foi conduzida com base em manuais e roteiros de laboratório e em referências acadêmicas. Ainda não foi realizada validação sistemática em projetos reais de escritórios de engenharia, com diversidade maior de cargas específicas, critérios de projetista e cenários de fornecimento.

5.4 Trabalhos futuros

Como continuidade natural deste trabalho, destacam-se as seguintes extensões com potencial de alto impacto:

- **Ampliação do escopo normativo e verificações de projeto:** incorporar rotinas de verificação de queda de tensão, curto-circuito, aterramento, requisitos de DR e restrições adicionais por ambiente, bem como critérios de seletividade e coordenação com DPS, aproximando o agente de um fluxo de projeto completo.
- **Entrada avançada e maior robustez na interpretação da planta:** expandir a entrada para formatos técnicos (por exemplo, arquivos CAD) e aprimorar a extração de informações em plantas por imagem, tornando o processo menos sensível à qualidade da captura.
- **Geração de artefatos de projeto:** além do memorial de cálculo, incluir geração de diagrama unifilar da instalação e do quadro de distribuição, bem como relatórios em formatos adicionais, ampliando a utilidade prática do sistema.
- **Parametrização de critérios de projetista:** permitir que o usuário defina, na etapa conversacional, critérios como método de instalação, fatores de correção e premissas de detalhamento, reduzindo divergências associadas a escolhas de projeto e ampliando a flexibilidade do agente.
- **Validação ampliada com usuários reais:** conduzir estudos com discentes, empresas juniores e profissionais de engenharia elétrica para comparar resultados, coletar feedback, medir ganhos de produtividade e refinar critérios de interação, aproximando a solução de um cenário de uso prático e recorrente.

- **Generalização para múltiplas concessionárias e cenários de fornecimento:** ampliar a base de diretrizes de fornecimento, incluindo regras de diferentes concessionárias, e avaliar sistematicamente casos com fornecimento bifásico e trifásico com balanceamento.

REFERÊNCIAS

ADEBAYO, Y.; UDOH, P.; KAMUDYARIWA, X. B.; OSOBAJO, O. A. Artificial intelligence in construction project management: A structured literature review of its evolution in application and future trends. **Digital**, MDPI, v. 5, n. 3, p. 26, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

LEWIS, P.; PEREZ, E.; PIKTUS, A.; PETRONI, F.; KARPUKHIN, V.; GOYAL, N.; KÜTTLER, H.; LEWIS, M.; YIH, W.-t.; ROCKTÄSCHEL, T.; RIEDEL, S.; KIELA, D. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks. In: **Advances in Neural Information Processing Systems**. [S.l.]: Curran Associates, Inc., 2020. v. 33, p. 9459–9474.

NGUYEN, S. S.; KITTUR, J. Review of current and potential uses of large language models in engineering. **Frontiers in Education**, Frontiers, v. 10, 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Projeto Elétrico Residencial: Enunciado e Gabarito**. 2023. Material didático do curso de Instalações Elétricas.