

Universidade de Brasília – UnB  
Campus Gama – FGA  
Engenharia de Energia

**Sistema de simulação de circuitos trifásicos com  
variação de cenários de operação para análise de  
eficiência em redes de transmissão e distribuição  
de energia elétrica**

LOURENÇO HENRIQUE NEVES GUIMARÃES  
Orientador: Dr. CRISTIANO JACQUES MIOSSO



LOURENÇO HENRIQUE NEVES GUIMARÃES

**Sistema de simulação de circuitos trifásicos com  
variação de cenários de operação para análise  
de eficiência em redes de transmissão  
e distribuição de energia elétrica**

Monografia submetida ao curso de graduação em  
Engenharia de Energia da Universidade de Brasília,  
como requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dr. Cristiano Jacques Miosso

Brasília, DF  
2015

Brasília/DF, Julho de 2015

#### FICHA CATALOGRÁFICA

GUIMARÃES, LOURENÇO HENRIQUE NEVES

Sistema de simulação de circuitos trifásicos com variação de cenários de operação para análise de eficiência em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica.

85p., 210 × 297 mm (FGA/UnB Gama, Engenharia de Energia, 2015)

Trabalho de graduação em engenharia de energia

Universidade de Brasília, Campus Gama – FGA/UnB

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1. Análise de sistemas de potência | 2. Simulação de sistemas de potência     |
| 3. Circuitos trifásicos            | 4. Transmissão e distribuição de energia |
| I. FGA UnB/UnB.                    | II. Título (série)                       |

#### REFERÊNCIA

GUIMARÃES, LOURENÇO HENRIQUE NEVES (2015). Sistema de simulação de circuitos trifásicos com variação de cenários de operação para análise de eficiência em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Dissertação de graduação em engenharia de energia, Universidade de Brasília, Campus Gama, DF, 85p.

**FGA/UnB – Universidade de Brasília, Campus Gama**

**Sistema de simulação de circuitos trifásicos com  
variação de cenários de operação para análise  
de eficiência em redes de transmissão  
e distribuição de energia elétrica**

***Lourenço Henrique Neves Guimarães***

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

APROVADA POR:

---

Prof. Cristiano Jacques Miosso, PhD  
(Orientador)

---

Prof. Flávio Henrique J. R. da Silva, PhD  
(Examinador interno)

---

Prof<sup>a</sup> Fabiano Araujo Soares, PhD  
(Examinador interno)

## Resumo

Independentemente de como a energia elétrica é gerada, deseja-se que ela seja transmitida ao usuário da forma mais eficiente possível. A dissertação aborda eficiência energética em sistemas elétricos de potência, um problema de engenharia que afeta interesses estratégicos, econômicos e sociais.

A análise de eficiência energética numa planta de extensa, com grande quantidade de elementos e linhas, envolve cálculos que demandam auxílio computacional. A proposta é desenvolver um sistema de simulação que facilite a operação para o usuário e possibilite observar aspectos de eficiência em uma planta.

Muito difundido no ambiente acadêmico, o SPICE é um programa de código aberto que possui diversas distribuições comerciais, cada uma voltada a um aspecto específico da simulação de circuitos elétricos. O sistema proposto pretende suprir a lacuna encontrada no nicho específico de análise de eficiência energética em sistemas trifásicos.

O sistema proposto integra o SPICE ao programa comercial MatLab<sup>®</sup>, com intuito de aproveitar as ferramentas matemáticas que este fornece. Além disso, o MatLab<sup>®</sup> é um programa de utilização bastante conhecida no ambiente acadêmico, o que facilita bastante a familiarização do usuário com o sistema.

O sistema permite descrever circuitos com maior facilidade e agilidade, disponibiliza ferramentas prontas para cálculo de eficiência energética, oferece possibilidades de alteração de configuração em circuitos e é capaz de analisar cenários e indicar a melhor possibilidade de configuração possível.

A dissertação apresenta testes de validação, testes de comprovação teórica conhecida e propostas de plantas complexas com alterações de cenário pseudoaleatórias com resposta de melhor configuração. O teste final compara a eficiência de um sistema fixo com o mesmo sistema sendo capaz de se adaptar às alterações e responder com a melhor configuração possível.

**Palavras-chaves:** Simulador, Sistemas de Potência, Circuitos Trifásicos, Análise de Sistemas de Potência, MatLab<sup>®</sup>, *SPICE*, Transmissão de Energia Elétrica, Distribuição de Energia Elétrica.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Contextualização	12
1.2	Problematização e Proposta	13
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	Justificativas	15
1.5	Estrutura da dissertação	16
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica</b>	<b>18</b>
2.1	Circuitos trifásicos	18
2.1.1	Conexão estrela-estrela balanceada	19
2.1.2	Conexão estrela-delta balanceada	20
2.1.3	Conexão delta-delta balanceada	21
2.1.4	Conexão delta-estrela balanceada	22
2.1.5	Sistemas trifásicos desbalanceados	24
2.1.6	Transformadores trifásicos	24
2.2	Potência	26
2.2.1	Corrente e tensão alternada	27
2.2.2	Potência instantânea	29
2.2.3	Potência real ou potência ativa	30
2.2.4	Potência reativa	31
2.2.5	Potência aparente	31
2.2.6	Fator de potência	31
2.2.7	Potência complexa	32
2.2.8	Correção do fator de potência	33
2.3	Perdas	35
2.3.1	Perda ôhmica	35
2.3.2	Perda associada a potência reativa	36
2.3.3	Entrega de potência em sistemas com cargas ativas e reativas	36
2.4	O simulador de circuitos SPICE	38
2.4.1	Descrição do circuito no SPICE	39
2.4.2	Especificação do tipo de análise no SPICE	40

2.4.3	Especificação dos resultados no SPICE . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>42</b>
3.1	Desenvolvimento da metodologia . . . . .	42
3.1.1	Nível 1: criação e leitura de arquivo tipo <i>netlist</i> . . . . .	42
3.1.2	Nível 2: comandos de simulação de MatLab <sup>®</sup> para SPICE . . . . .	45
3.1.3	Nível 3: controle de alterações de configuração . . . . .	46
3.1.4	Nível 4: análise de eficiência energética e escolha de melhor possibi- lidade de configuração . . . . .	47
3.2	Procedimentos experimentais . . . . .	49
3.3	Metodologia de análise . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>58</b>
4.1	Exemplos para validação da metodologia . . . . .	58
4.1.1	Exemplo trifásico simples . . . . .	58
4.1.2	Exemplo com transformador trifásico . . . . .	60
4.1.3	Teste dos Níveis 3 e 4 . . . . .	63
4.2	Testes propostos . . . . .	65
4.2.1	Teste 1: Cálculo de eficiência energética numa planta robusta . . . . .	65
4.2.2	Teste 2: Análise de eficiência da transmissão com diferentes tamanhos de linha . . . . .	66
4.2.3	Teste 3: Análise do impacto da transmissão em alta tensão . . . . .	67
4.2.4	Teste 4: Análise de tensão de entrada . . . . .	69
4.2.5	Teste 5: Resposta de melhor configuração com duas opções de elemen- tos configuráveis . . . . .	70
4.2.6	Teste 6: Inserção de elemento aleatório com resposta de melhor confi- guração . . . . .	72
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>83</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Variação da eficiência em função da impedância de linha . . . . .	39
2.2	Sintaxes para declaração de elementos . . . . .	39
2.3	Fatores multiplicadores. . . . .	40
2.4	Sintaxe para atributos de fontes . . . . .	40
2.5	Sintaxe para especificação de tipo de análise . . . . .	41
2.6	Sintaxe para especificação de saída de resultado . . . . .	41
4.1	Descrição do circuito para os Testes 1 e 4 . . . . .	76
4.2	Descrição do circuito para o Teste 2 . . . . .	77
4.3	Resultados do Teste 2: configurações e eficiências. . . . .	77
4.4	Descrição do circuito para o Teste 3 . . . . .	77
4.5	Resultados do Teste 3: configurações e eficiências. . . . .	77
4.6	Resultados do Teste 4: configurações e eficiências. . . . .	78
4.7	Descrição do circuito para o Teste 5 . . . . .	78
4.8	Resultados do Teste 5: configurações e eficiências. . . . .	78
4.9	Descrição do circuito para o Teste 6 . . . . .	78
4.10	Resultados do Teste 6: eficiências com e sem adaptação para simulação com 8 ciclos. . . . .	79
4.11	Resultados do Teste 6: eficiências com e sem adaptação para simulação com 25 ciclos. . . . .	81

# Lista de Figuras

2.1	Representação genérica de um circuito trifásico. . . . .	18
2.2	Ligações de fontes trifásicas – (a) estrela e (b) delta. . . . .	19
2.3	Configuração da ligação estrela-estrela - (a) ligação com impedâncias da fonte, da linha e da carga; (b) representação simplificada, com impedâncias em série juntas numa equivalente. . . . .	20
2.4	Configuração da ligação estrela-delta. . . . .	21
2.5	Configuração da ligação delta-delta. . . . .	22
2.6	Configuração da ligação delta-estrela. . . . .	23
2.7	Transformação de ligação delta em estrela. . . . .	23
2.8	Exemplo de carga desbalanceada. . . . .	24
2.9	Exemplo simples de circuito monofásico magneticamente acoplado. . . . .	25
2.10	Esquema de transformador trifásico estrela-estrela (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). . . . .	26
2.11	Esquema de transformador trifásico delta-delta. (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas) . . . . .	26
2.12	Esquema de transformador trifásico estrela-delta (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). . . . .	27
2.13	Esquema de transformador trifásico delta-estrela (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). . . . .	28
2.14	Período e defasagem em tensões senoidais. . . . .	29
2.15	Tensão RMS, média e de pico. . . . .	30
2.16	Potência instantânea entrando num circuito. . . . .	30
2.17	Triângulo de potências (a) e triângulo de impedâncias (b) . . . . .	33
2.18	Carga indutiva (a); ligação de capacitor para correção de fator de potência (b); visualização do efeito da ligação do capacitor através de um triângulo de potências (c). . . . .	34
2.19	Triângulo de potências ilustrando correção de fator de potência. . . . .	34
2.20	Representação gráfica unifilar do circuito trifásico simulado. . . . .	37
2.21	Comandos de entrada para descrição do circuito e cálculo da eficiência. . . . .	38
2.22	Tela de comando do MatLab <sup>®</sup> com os valores de eficiência calculados. . . . .	38
3.1	Código da função <i>generate basic netlist file</i> . . . . .	51
3.2	Código da função <i>netlist2matlab</i> . . . . .	52
3.3	Código da função <i>netlist add</i> . . . . .	52

3.4	Trecho do código da função <i>netlist add impedance</i> . . . . .	52
3.5	Comandos de entrada para as funções <i>netlist add impedance triphase star</i> e <i>netlist add impedance triphase delta</i> . . . . .	53
3.6	Trecho do código da função <i>netlist add source triphase star</i> . . . . .	53
3.7	Trecho do código da função <i>netlist add transformer triphase star</i> . . . . .	54
3.8	Código da função <i>netlist add vnull triphase</i> . . . . .	54
3.9	Trecho do código da função <i>ac analysis</i> . . . . .	55
3.10	Trecho do código da função <i>dc analysis</i> . . . . .	55
3.11	Trecho do código da função <i>trans analysis</i> . . . . .	56
3.12	Comandos de entrada para a função <i>netlist replace element value</i> . . . . .	56
3.13	Exemplificando os comandos de entrada para a função <i>netlist replace element value</i> . . . . .	56
3.14	Exemplificando os comandos de entrada para a função <i>evaluate energy efficiency</i> . . . . .	56
3.15	Exemplificando os comandos de entrada para a função <i>evaluate all controllable configurations</i> . . . . .	57
3.16	Relação entre as matrizes ‘ <i>energy efficiencies</i> ’ e ‘ <i>I</i> ’ da função <i>evaluate all controllable configurations</i> . . . . .	57
4.1	Circuito da questão reproduzida. . . . .	58
4.2	Código utilizando as funções do sistema para resolução do exercício da referência. . . . .	59
4.3	Resultado calculado pelo sistema exibido no painel do MatLab <sup>®</sup> , ao lado da resolução do exercício da referência [1]. . . . .	60
4.4	Códigos necessários para a solução do problema utilizando o SPICE (1) e utilizando o sistema desenvolvido (2). . . . .	61
4.5	Representação em diagrama do circuito hipotético proposto para o teste. . . . .	61
4.6	Trecho do código utilizado para o exemplo, descrevendo o circuito e definindo o tipo de simulação. . . . .	62
4.7	Trecho do código utilizado para o exemplo, descrevendo as saídas desejadas: diagramas fasoriais e gráficos senoidais. . . . .	63
4.8	Saídas de resultados solicitadas no exemplo do transformador trifásico: diagrama fasorial das tensões de saída e superposição das senoides num gráfico. . . . .	64
4.9	Saídas de resultados solicitadas no exemplo do transformador trifásico: diagrama fasorial das tensões de entrada e saída e superposição das senoides das mesmas tensões num gráfico. . . . .	65
4.10	Trecho do código utilizado para o exemplo. Na linha 11, o vetor das impedâncias que compõem a carga tem a alteração na terceira fase. . . . .	65

4.11	Saídas de resultados solicitadas no exemplo do transformador trifásico com carga desbalanceada: diagrama fasorial das tensões de saída e superposição das senoides das mesmas tensões num gráfico. . . . .	66
4.12	Códigos necessários para a solução do problema utilizando o SPICE (1) e utilizando o sistema desenvolvido (2). . . . .	67
4.13	Entradas utilizadas para rodar o exemplo proposto para validação dos Níveis 3 e 4. . . . .	68
4.14	Resultado do teste de validação dos Níveis 3 e 4 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	69
4.15	Potências de entrada do Teste 1 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	70
4.16	Potências de saída do Teste 1 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	70
4.17	Eficiência do Teste 1 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	71
4.18	Comandos para o Teste 2: cálculo de eficiência com variação na linha ‘zline1’. . . . .	71
4.19	Resultados do Teste 2: melhor configuração e eficiências. . . . .	72
4.20	Tensões na carga do Teste 3 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	72
4.21	Resultados do Teste 3 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	73
4.22	Tensões na carga medidas no Teste 4 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	73
4.23	Resultados do Teste 4 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	74
4.24	Resultado do Teste 5 na tela de comando do MatLab <sup>®</sup> . . . . .	75
4.25	Entradas para o Teste 6: definição das variações não controláveis. . . . .	75
4.26	Entradas para o Teste 6: definição das variações não controláveis e configuração das entradas controláveis. . . . .	79
4.27	Resultado do Teste 6: gráfico comparando eficiências nos casos adaptado e não adaptado com 8 ciclos. . . . .	80
4.28	Resultado do Teste 6: gráfico comparando eficiências nos casos adaptado e não adaptado com 25 ciclos. . . . .	82

# 1 Introdução

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um simulador para análise de circuitos trifásicos que compõem sistemas elétricos de potência, em redes de transmissão ou distribuição de energia elétrica, para análise do funcionamento desses sistemas quando sujeitos a diferentes modos de operação.

O Capítulo 1 detalha a proposta de trabalho, abordando inicialmente o impacto das questões energéticas na sociedade, reforçando a relevância dos crescentes investimentos e políticas públicas em Eficiência Energética. É exposta a problemática que motivou a proposta do desenvolvimento do sistema de avaliação de eficiência energética. São apresentados ainda os objetivos que se deseja atingir com o trabalho, as justificativas sociais, acadêmicas e estruturais do modelo de sistema proposto e a apresentação da estrutura da dissertação que aqui se inicia. O capítulo finaliza com uma breve apresentação da estrutura da dissertação.

## 1.1 Contextualização

Um sistema elétrico de potência é composto pelos subsistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Toda a energia elétrica gerada, independentemente do tipo de geração, chega ao usuário final através de linhas de distribuição e transmissão. As linhas são obras de grande porte, com extensões da ordem de centenas de quilômetros – o segmento de transmissão no Brasil é composto por mais de 90 mil quilômetros de linhas [3].

A eletricidade é suprimento fundamental para o funcionamento civil como um todo. Portanto, é constante a busca por evolução tecnológica, de forma a tornar os equipamentos e processos envolvidos capazes de oferecer mais eficiência e confiabilidade.

Sistemas elétricos de potência possuem a condição de não armazenamento de energia, de forma que a geração e o transporte precisam suprir a demanda de potência requisitada ininterruptamente, conforme [13]. No montante demandado existem ainda perdas, que influenciam diretamente na eficiência do processo. Diminuí-las significa facilitar o suprimento da demanda e ainda tornar o custo da energia mais baixo, resultados que interessam a todos os envolvidos.

Segundo o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) [5], trabalho realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) com a colaboração de outros entes governamentais, Eficiência Energética pode ser definida como ‘ações de naturezas diversas que culminam na redução da energia necessária para atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor ou frio, acionamento, transportes e uso em processos’. Ainda

segundo o PNEf, o objetivo das ações de eficiência energética é ‘atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária e, portanto, menor impacto da natureza’[5].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da regulamentação do Programa de Eficiência Energética (PEE), definiu que as concessionárias e permissionárias de distribuição têm o dever de aplicar um montante mínimo de 0,5% de sua receita operacional líquida em ações de combate ao desperdício de energia elétrica [4]. Os recursos vêm sendo aplicados em diversas frentes como conscientização, capacitação e desenvolvimento tecnológico. É necessário mostrar à população a importância do tema, tornando-a comprometida em contribuir através do consumo consciente. Igualmente necessário é dar acesso ao conhecimento, de forma que se tenha condição de dominar as novas tecnologias que vem sendo desenvolvidas e capacidade para trabalhar na criação de novas alternativas.

A grande quantidade de energia elétrica consumida torna pequenos percentuais de ganho de eficiência bastante relevantes. Um pequeno exercício de cálculo retrata este fato: supondo 0,5 por cento de ganho de eficiência em cima da potência instalada de uma grande usina hidroelétrica (UHE), da ordem de 5.000 MW, têm-se 25 MW – equivalentes à potência de uma pequena central hidroelétrica (PCH) próxima ao limite superior da classe (até 30 MW).

No campo da economia, estrategicamente, a questão energética é prioritária. A energia elétrica é um insumo comum a praticamente todo tipo de processo produtivo. Aumento no custo da energia elétrica gera aumento no custo desses processos, causando aumento no preço final dos produtos que resulta em aumento nas pressões inflacionárias.

As grandes hidroelétricas são a principal fonte de energia elétrica no Brasil[5], e implantá-las vem sendo cada vez mais complicado. O caso da UHE de Belo Monte, no Rio Xingu, exemplifica as problemáticas enfrentadas por quem dirige projetos dessa magnitude. Diversas polêmicas de cunho ambiental, somadas à burocracia natural que envolve a aplicação de recursos públicos em infraestrutura, acabam por causar atrasos que podem chegar a comprometer a capacidade de suprimento de demanda.

Diante da magnitude que o consumo de energia elétrica atingiu, o aprimoramento das técnicas de redução de perda energética nos sistemas elétricos de potência é uma necessidade latente.

## 1.2 Problematização e Proposta

O SPICE é um software de código aberto, com diversas distribuições gratuitas, e é uma poderosa ferramenta de testes de comportamento de circuitos elétricos, com bastante aceitação na comunidade acadêmica em geral. O MatLab<sup>®</sup> por sua vez é um software comercial, especializado em cálculo numérico, que será utilizado integrado ao SPICE no desenvolvimento

do sistema com o objetivo de aumentar a quantidade e qualidade dos recursos de montagem de plantas e análise de dados gerados pelo simulador SPICE.

Existem trabalhos de simulação que avaliam sistemas de transmissão ou distribuição complexos [12] [14]. Entretanto, em geral o estudo é caso a caso no que diz respeito a alterações no sistema e o respectivo impacto na eficiência. Este projeto propõe o desenvolvimento e a avaliação de um sistema que permite simular plantas básicas de transmissão ou distribuição de energia elétrica, oferecendo como diferencial a possibilidade de alteração da configuração dos dispositivos que compõem a planta de maneira automática, flexível, previamente programada e que ocorra durante uma simulação.

A ideia é contemplar as diversas possibilidades, aleatórias ou não, de ocorrência de fatores não controlados que afetam o desempenho energético, como ligações clandestinas ou quedas de linhas. Então, entre as configurações controláveis disponíveis, deseja-se testar qual delas retorna melhor desempenho em termos de eficiência energética no processo de transmissão da energia e disponibilização de potência.

A análise de eficiência energética no processo de transmissão e distribuição de energia elétrica é um campo de total interesse da Engenharia de Energia. O produto final proposto pode se tornar uma possibilidade de experimentação e simulação acadêmica para a graduação na Faculdade do Gama (FGA).

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do projeto é o desenvolvimento de um sistema capaz de simular uma planta de distribuição ou transmissão de energia elétrica, explorando as possibilidades de variação não controladas do sistema e verificando o impacto destas na eficiência do processo.

Diante desse impacto, o sistema deve testar as possibilidades disponíveis de alteração controlada na configuração da planta, de forma a indicar quais mudanças podem retornar melhora na eficiência do processo em relação à não atuação.

Deseja-se que o sistema seja operado completamente através da interface MatLab<sup>®</sup>, de forma a facilitar a montagem da planta em relação à utilização direta do SPICE e aumentar as possibilidades de recursos para tratamento dos dados provenientes das simulações.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um conjunto de funções no MatLab<sup>®</sup> que permitam criar, ler, modificar circuitos elétricos trifásicos representados por listas de elementos elétricos no formato

SPICE;

- Desenvolver funções para a simulação dos circuitos representados no MatLab<sup>®</sup> por meio de chamadas a um programa SPICE externo, mas de forma transparente para o usuário (o usuário define, modifica, lê e simula circuitos de dentro do MatLab<sup>®</sup> com todos os recursos que ele fornece);
- Desenvolver um software que permita, para um dado sistema elétrico apresentado, testar diversas configurações de dispositivos ou elementos controláveis (linhas de transmissão, cargas opcionais, etc.) e avaliar a eficiência energética em cada configuração testada;
- Realizar a validação do conjunto de funções desenvolvidas ao longo de todas as etapas do processo de desenvolvimento do sistema, utilizando como base exercícios da literatura que contem com solução e comparando os valores obtidos nas simulações com os valores constantes na referência;
- Realizar outra etapa de validação por meio da comparação de resultados obtidos no sistema desenvolvido com resultados obtidos no *SimPowerSystems* do MatLab<sup>®</sup>;
- Realizar o estudo de caso em que um sistema de distribuição/transmissão sofre variações por forças da natureza ou externas ao gerenciador do sistema (e.g.: queda de linhas, ligações clandestinas, aumentos ou diminuições de carga, etc). Em cada um desses cenários, definir quais das alterações controladas resultam em melhor desempenho energético, usando o software do item 3;
- Comparar a eficiência energética de um sistema não-adaptável com a eficiência do sistema adaptável usando o software do item 3, diante de cenários com variações por força da natureza, etc.

## 1.4 Justificativas

O sistema tem como propósito mostrar em que condições um dado sistema real, altamente variável, pode ter sua eficiência energética melhorada a partir de elementos controláveis da planta. A ferramenta é capaz de monitorar o desempenho da entrega de potência de sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica. Além disso, testa e propõe alterações nas configurações controláveis da planta para que o desempenho seja melhorado quando possível.

A interação entre SPICE e MatLab<sup>®</sup> permite analisar circuitos elétricos com maior maleabilidade do que apenas no SPICE. É possível variar parâmetros, adicionar e retirar elementos apenas no ambiente SPICE, mas o software não dispõe dos recursos de programação do MatLab<sup>®</sup>, extremamente úteis e facilmente programáveis através de funções.

A descrição do circuito é um exemplo disso, sendo possível torná-la mais simples programando um sistema que dependa de menos entradas. Principalmente em relação aos circuitos trifásicos, é vantajoso automatizar a parte repetitiva da descrição do circuito. A declaração individual de cada elemento por fase exige inúmeras linhas de comando na maneira tradicional, enquanto no sistema proposto é possível declarar uma fonte trifásica ou um transformador em apenas uma linha de comando.

Outro exemplo de tarefa facilitada é a ação de acrescentar elementos. O que tradicionalmente envolve alterar o arquivo de simulação, no sistema desenvolvido é possível que essas alterações sejam realizadas dentro de um laço, alterando e simulando a diversas variações do circuito de forma automática. Além de tornar a descrição do problema facilitada, é oferecida uma possibilidade de programação de alteração de cenários, de forma a aproximar a análise simulada da realidade e obter maior número de resultados e um menor período de tempo.

Devido à praticidade oferecida, o sistema pode ser utilizado como ferramenta didática interessante, conforme citado na seção 1.2. A possibilidade de simular uma planta real e propor as alterações que gerariam melhor eficiência também é uma atividade que pode ser desenvolvida em ambiente acadêmico, mas com possível interesse prático, dependendo dos resultados obtidos.

## 1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos:

- Capítulo 1: trata da contextualização, dos objetivos e da proposta do trabalho. São abordadas as questões que tornam o trabalho relevante, as principais metas que se objetiva atingir com o trabalho e a problematização que levou ao desenvolvimento da proposta.
- Capítulo 2: traz os conceitos básicos envolvidos no desenvolvimento do projeto, de maneira direta e concisa, abordando a teoria acadêmica relacionada à eletricidade e circuitos elétricos. Além disso, é mostrado um roteiro de utilização do simulador utilizado no sistema.
- Capítulo 3: detalha a metodologia adotada, explicando o desenvolvimento de cada um dos códigos produzidos e como é esperado que eles funcionem, indicando o também

como se espera que o usuário interaja com o sistema. São apresentados os procedimentos experimentais realizados com o sistema desenvolvido e o que se deseja observar com cada um deles.

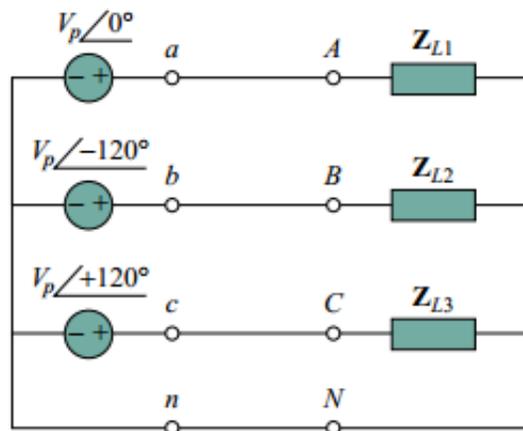
- Capítulo 4: traz os resultados obtidos nas simulações descritas nos procedimentos experimentais, possibilitando visualizar as aplicações e o potencial do sistema. São demonstrados trechos dos comandos necessários para que o sistema execute as atividades, os resultados, e a análises destes resultados.
- Capítulo 5: relata as conclusões principais obtidas com a utilização do sistema desenvolvido, listando os pontos onde ele apresenta funcionamento e operação adequados e os pontos onde se pode aprimorá-lo, elencando possíveis atividades futuras dentro do projeto. São apresentadas ainda as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento do trabalho acerca do uso dos programas escolhidos para a simulação e análise de eficiência energética em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

## 2 Fundamentação teórica

A pesquisa realizada para o desenvolvimento do trabalho envolve diversos aspectos teóricos relacionados à eletricidade de um modo geral. São revisados no Capítulo 2 alguns conceitos fundamentais como circuitos trifásicos, potência e perdas energéticas. Além disso, o capítulo traz informações sobre o simulador de circuitos elétricos SPICE, mostrando como são feitas as descrições dos circuitos e como são configuradas as simulações e exposição de resultados.

### 2.1 Circuitos trifásicos

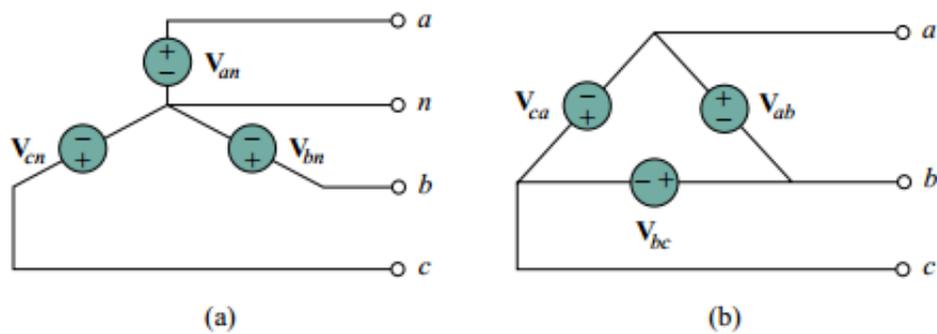
Um sistema trifásico elementar é composto por três fontes de tensão conectadas a cargas por meio de três ou quatro fios, dependendo da presença ou não do neutro, conforme mostra a Figura 2.1. As fontes de tensão podem estar conectadas em duas diferentes disposições chamadas de delta ou estrela, conforme ilustra a Figura 2.2. O mesmo ocorre com as cargas e os transformadores, que serão devidamente detalhados posteriormente.



**Figura 2.1.** Representação genérica de um circuito trifásico. Fonte: [1]

Sistemas trifásicos são interessantes por três pontos de vista em especial, a saber [8]:

1. Em geral, a energia elétrica é gerada e distribuída em três fases. Quando uma ou duas fases são necessárias, elas são retiradas do sistema trifásico ao invés de serem geradas independentemente;
2. A potência instantânea de um sistema trifásico pode ser constante ao invés de pulsante, resultando em uma transmissão de potência com menos oscilação;



**Figura 2.2.** Ligações de fontes trifásicas – (a) estrela e (b) delta. Fonte: [1]

3. A fiação total necessária para um sistema trifásico é menor em relação à necessária para um equivalente monofásico, gerando economia construtiva quando da escolha deste tipo de sistema.

Um sistema trifásico é dito balanceado quando tanto suas fontes de tensão quanto suas cargas são balanceadas. Uma fonte de tensão é balanceada quando as tensões das três fases têm a mesma magnitude e defasagem de  $120^\circ$  entre si. O exemplo da Figura 2.1 é de uma fonte de tensão balanceada. Uma carga trifásica é dita balanceada quando a carga das três fases é igual em magnitude e fase. No caso de tensões ou cargas que não obedecem a esses requisitos, o sistema trifásico é dito desbalanceado.

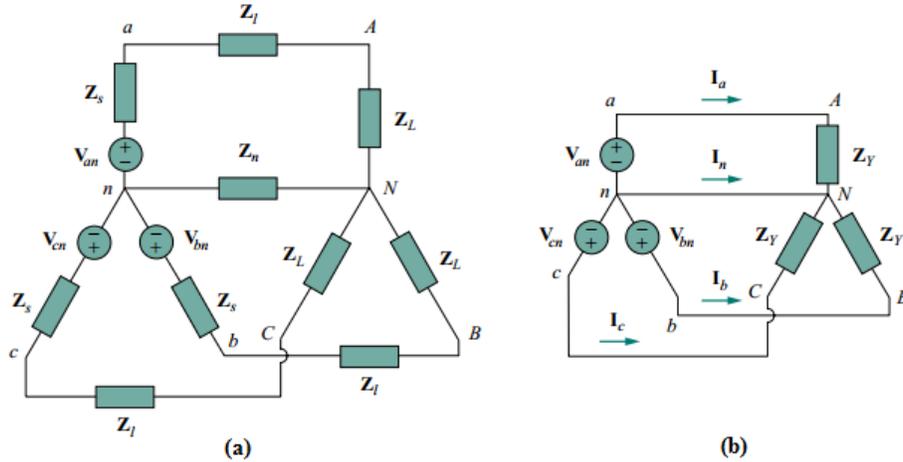
A abordagem da presente seção é feita inicialmente encima dos sistemas balanceados, listando particularidades de cada uma das quatro possibilidades de conexão possíveis: estrela-estrela, estrela-delta, delta-delta e delta-estrela. Posteriormente, serão abordadas as diferenças existentes em sistemas desbalanceados.

### 2.1.1 Conexão estrela-estrela balanceada

É a conexão mais simples, com fonte de tensão e cargas conectadas em estrela. É uma conexão que facilita em termos de cálculo, portanto em situações onde a ligação é estrela-delta ou delta-estrela, pode ser conveniente montar um equivalente estrela-estrela para facilitar a análise. A disposição dos elementos no sistema é ilustrada na Figura 2.3, onde em A tem-se as impedâncias da fonte, da linha e a carga em si, ambas repetidas nas três fases. Uma grande vantagem da conexão estrela-estrela é a possibilidade de juntar essas impedâncias numa simples soma, pelo fato delas estarem em série (em B, na Figura 2.3).

Em sistemas trifásicos é bastante usual trabalhar com os seguintes conceitos, segundo [1]:

1. Tensão de fase: é a tensão entre uma linha e o neutro;



**Figura 2.3.** Configuração da ligação estrela-estrela – (a) ligação com impedâncias da fonte, da linha e da carga; (b) representação simplificada, com impedâncias em série juntas numa equivalente. Fonte: [1]

2. Tensão de linha: é a tensão entre duas linhas;
3. Corrente de fase: é a corrente que passa em cada fase, da fonte ou da carga;
4. Corrente de linha: é a corrente que passa em cada linha.

É possível escrever relações envolvendo essas grandezas, que se diferenciam dependendo da ligação do sistema em questão. Utiliza-se como subscrito a letra L para linha e a letra F para fase. No caso da ligação estrela-estrela as relações são:

$$\hat{I}_{linha} = \hat{I}_{fase} \quad (2.1)$$

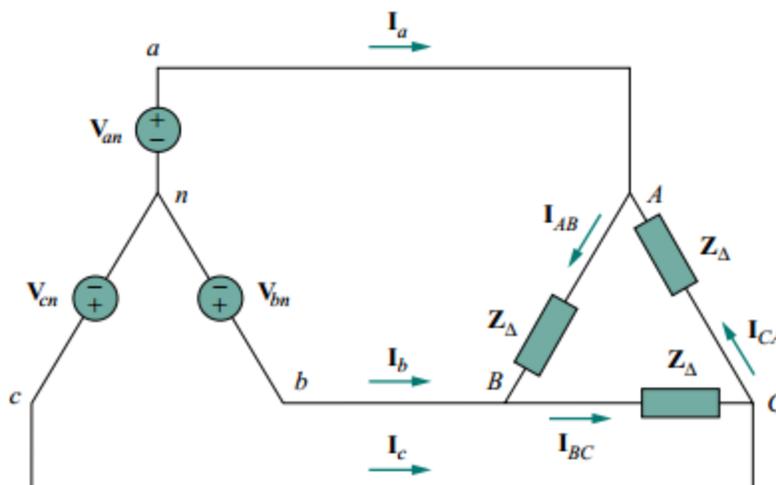
$$|\hat{V}_{linha}| = \sqrt{3}|\hat{V}_{fase}| \quad (2.2)$$

A expressão das tensões relaciona as magnitudes, e complementa-se o fasor de tensão com a informação de que as tensões de fase são defasadas de  $30^\circ$  em relação às respectivas tensões de linha.

### 2.1.2 Conexão estrela-delta balanceada

A conexão estrela-delta tem uma fonte trifásica do tipo estrela ligada a uma carga trifásica do tipo delta. Não há a possibilidade de ligação de neutro entre fonte e carga nesse caso, devido à ligação da carga ser do tipo delta. A Figura 2.4 mostra a ligação estrela-delta.

Percebe-se que desta vez, as tensões entre as linhas são as mesmas entre as fases da carga, diferentemente do que ocorre com a ligação estrela-estrela. Já as correntes não são mais as



**Figura 2.4.** Configuração da ligação estrela-delta. Fonte: [1]

mesmas, pois como pode ser observado elas se dividem antes das fases das cargas, nos nós A, B e C. As relações no caso da ligação estrela-delta balanceada são:

$$|\hat{I}_{linha}| = \sqrt{3}|\hat{I}_{fase}| \quad (2.3)$$

$$\hat{V}_{linha} = \hat{V}_{fase} \quad (2.4)$$

Em relação às correntes, a expressão só relaciona as magnitudes. O fasor de corrente é complementado com a informação de que a corrente de linha é defasada de  $30^\circ$  em relação à sua corrente de fase correspondente.

Outra possibilidade para a análise deste tipo de circuito é transformar a carga da ligação delta para a ligação estrela. No caso de sistemas balanceados, o procedimento é bastante simples - basta considerar que:

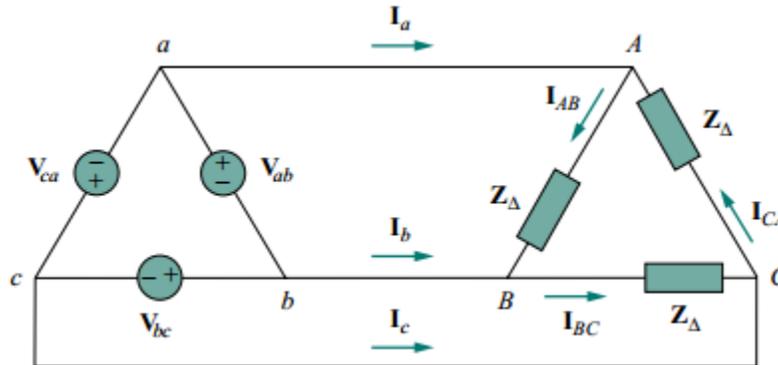
$$\hat{Z}_Y = \frac{\hat{Z}_\Delta}{3} \quad (2.5)$$

Obtendo os valores das impedâncias convertidas de delta para estrela, pode-se redesenhar o circuito como um equivalente estrela-estrela e resolvê-lo de acordo com as relações apropriadas, mostradas na seção anterior.

### 2.1.3 Conexão delta-delta balanceada

A conexão delta-delta tem uma fonte trifásica do tipo delta ligada a uma carga trifásica também do tipo delta. É mais um caso onde não há a possibilidade de ligação de neutro

entre fonte e carga, pois tanto carga como fonte estão ligados em delta. A Figura 2.5 mostra um esquema da ligação delta-delta.



**Figura 2.5.** Configuração da ligação delta-delta. Fonte: [1]

Observa-se que, assim como no caso da ligação estrela-delta, as tensões de linha e de fase são iguais (entre os pontos  $a$ - $b$  e  $A$ - $B$ ). Em relação às correntes, também ocorre o mesmo que na ligação estrela-delta, com a corrente de linha se dividindo antes de entrar na carga. As expressões são as mesmas do caso estrela-delta (expressões (2.3) e (2.4)), e as correntes de linha também são defasadas de  $30^\circ$  em relação às correntes de fase correspondentes.

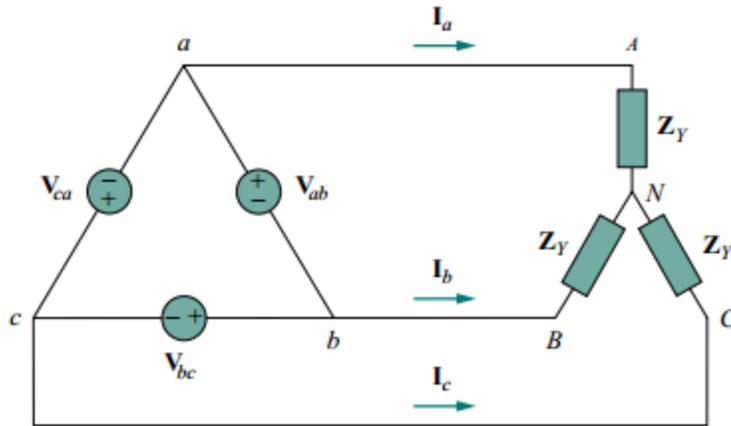
É possível transformar o sistema com ligação delta-delta em um sistema estrela-estrela equivalente, utilizando a expressão de transformação de impedância apresentada na seção anterior (expressão (2.5)) e o método de transformação de fonte de tensão que será apresentado na seção seguinte.

### 2.1.4 Conexão delta-estrela balanceada

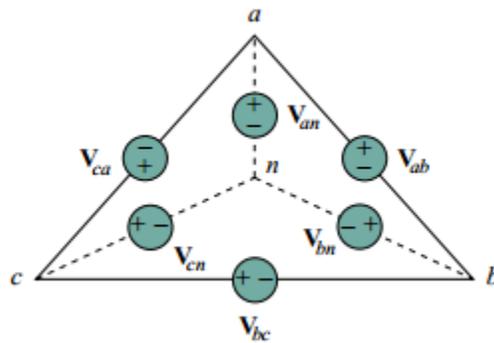
A conexão delta-estrela tem uma fonte trifásica do tipo delta ligada a uma carga trifásica do tipo estrela. É outro caso onde não há a possibilidade de ligação de neutro entre fonte e carga, pelo fato da fonte ser ligada em delta. A Figura 2.6 mostra um esquema da ligação delta-estrela.

Essa configuração tem tensões de fase e de linha iguais, assim como as correntes de fase e de linha, também iguais. É possível analisar este tipo de circuito transformando a fonte conectada em delta para uma fonte equivalente em estrela, conforme ilustra a Figura 2.7 e a expressão (2.6).

$$|\widehat{V}_{an}| = |\widehat{V}_{bn}| = |\widehat{V}_{cn}| = \frac{|\widehat{V}_{fase}|}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$



**Figura 2.6.** Configuração da ligação delta-estrela. Fonte: [1]



**Figura 2.7.** Transformação de ligação delta em estrela. Fonte: [1]

O módulo das tensões da fonte em estrela equivalente é igual ao módulo da fase em delta dividido pelo fator  $\sqrt{3}$ . O fasor é complementado com a informação de que as tensões equivalentes em estrela são defasadas em  $30^\circ$  em relação às correspondentes em delta.

Da mesma maneira é possível transformar a carga originalmente em estrela em uma carga equivalente conectada em delta, obtendo um sistema delta-delta equivalente.

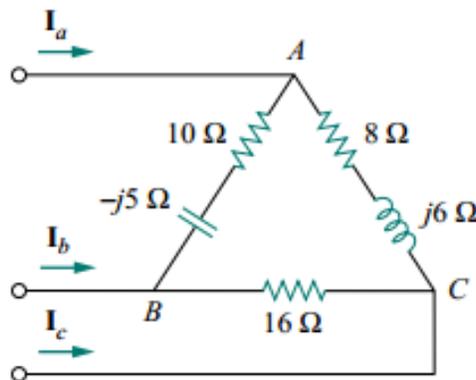
Cargas trifásicas em ligação delta são mais comuns e usuais, devido à facilidade com que pode manusear cargas de uma fase sem interferir na ligação das outras fases. Por outro lado, fontes trifásicas são usualmente construídas na ligação estrela pois, quando são ligadas em delta e minimamente desbalanceadas, apresentam correntes circulantes indesejadas, de acordo com [1].

### 2.1.5 Sistemas trifásicos desbalanceados

Sistemas trifásicos são desbalanceados quando atendem a pelo menos um dos seguintes requisitos:

1. As tensões das fases da fonte têm magnitude distinta;
2. A defasagem entre as tensões das fases da fonte não são de  $120^\circ$ ;
3. As impedâncias da carga trifásica não são iguais.

Basicamente, o sistema é desbalanceado quando possui ou uma fonte ou uma carga desbalanceada. A Figura 2.8 ilustra o caso mais comum, que é a carga desbalanceada.



**Figura 2.8.** Exemplo de carga desbalanceada. Fonte: [1]

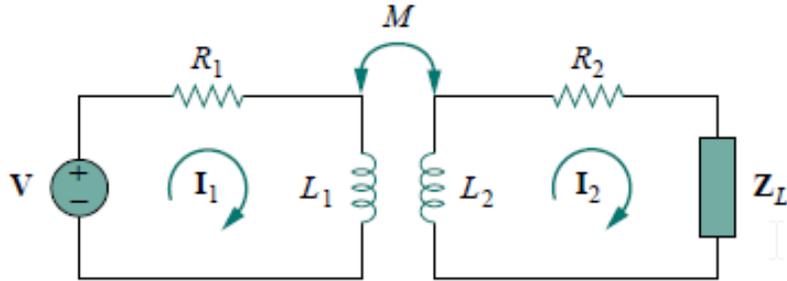
Sistemas balanceados tem análise simplificada em termos de cálculo, uma vez que conhecendo as diferenças entre as ligações é possível calcular correntes e tensões de linha ou de fase apenas aplicando o fator  $\sqrt{3}$  e a defasagem de  $30^\circ$ , conforme mostrado nas seções anteriores.

Um sistema desbalanceado não fornece essa facilidade, sendo necessário aplicar técnicas de análise de malha de circuito para obter as grandezas necessárias. Em termos de potência, não é possível calcular a potência total entregue a carga apenas multiplicando a potência entregue a uma das fases por três. É necessário efetuar a soma da potência em cada uma das três fases, pois elas receberão correntes e tensões distintas entre si.

### 2.1.6 Transformadores trifásicos

O transformador é um dispositivo que se utiliza do fenômeno da indutância mútua, num circuito magneticamente acoplado, para aumentar ou diminuir determinado nível de tensão a

partir de certo ponto do circuito onde é instalado [8]. A Figura 2.9 ilustra um transformador linear simples, onde o enrolamento  $L_1$  é o enrolamento do lado chamado de primário, o lado onde o enrolamento é diretamente conectado à fonte, e o enrolamento  $L_2$  fica no lado chamado secundário, o lado diretamente conectado à carga. O ‘ $M$ ’ representa a indutância mútua entre  $L_1$  e  $L_2$ .



**Figura 2.9.** Exemplo simples de circuito monofásico magneticamente acoplado. Fonte: [1]

Em um circuito trifásico é possível utilizar um transformador simples por fase, mas o que ocorre com maior frequência é a utilização de transformadores trifásicos. Geralmente opta-se pelo uso de transformadores trifásicos por ser esta uma opção menor (em termos de peso e volume) e menos onerosa.

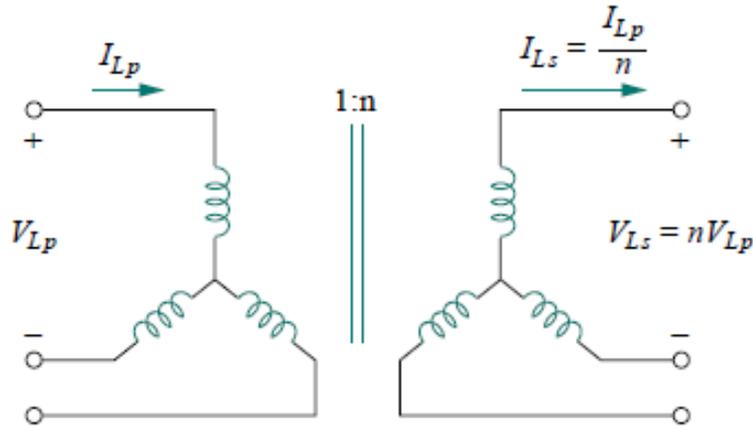
Assim como as ligações diretas (sem transformação de tensão) entre fonte e carga listadas nas seções anteriores, um transformador pode ter suas bobinas ligadas em delta ou estrela, em seus lados primário e secundário. Portanto, assim como no caso das ligações de fonte e carga, existem quatro possibilidades distintas de transformadores trifásicos: estrela-estrela, delta-delta, estrela-delta e delta-estrela.

Um transformador trifásico estrela-estrela é representado esquematicamente na Figura 2.10. Na própria imagem são mostradas as relações entre as tensões e correntes de primário e secundário.

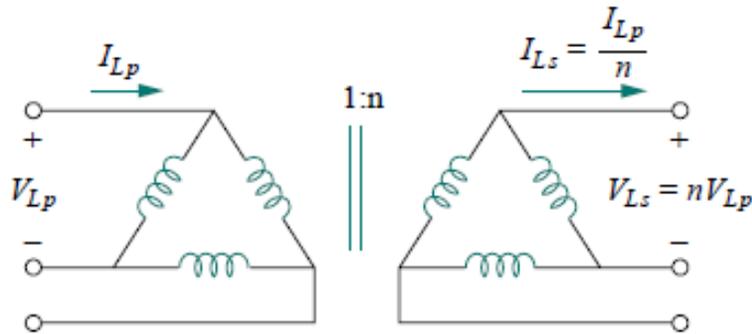
Um transformador trifásico delta-delta é representado esquematicamente na Figura 2.11. Na própria imagem são mostradas as relações entre as tensões e correntes de primário e secundário.

É interessante destacar que esta conexão em particular fornece a possibilidade de que se retire de um dos transformadores, por exemplo, para uma eventual manutenção, e o sistema se mantém em funcionamento (com diferente nível de tensão em relação ao fornecido pela totalidade dos transformadores).

Um transformador trifásico estrela-delta é representado esquematicamente na Figura 2.12. Na própria imagem são mostradas as relações entre as tensões e correntes de primário e secundário.



**Figura 2.10.** Esquema de transformador trifásico estrela-estrela (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). Fonte: [1]



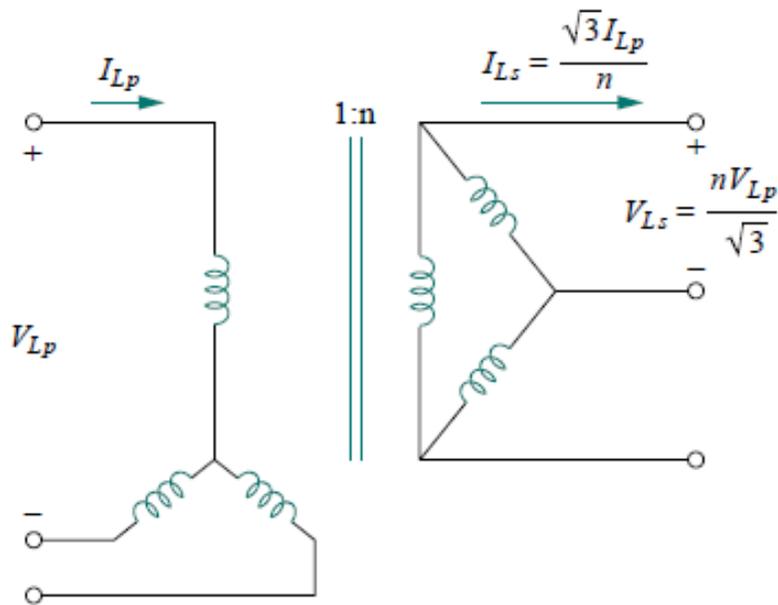
**Figura 2.11.** Esquema de transformador trifásico delta-delta (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). Fonte: [1]

Finalmente, um transformador trifásico delta-estrela é representado esquematicamente na Figura 2.13. Na própria imagem são mostradas as relações entre as tensões e correntes de primário e secundário.

## 2.2 Potência

Corrente elétrica e tensão elétrica são grandezas elementares e fundamentais no estudo de circuitos elétricos, no entanto não são suficientes para descrevê-los por completo [6]. Quando se trata da análise de sistemas de potência, como denota a denominação do sistema em si, o parâmetro a ser tratado com mais atenção é a potência.

Potência é fisicamente definida como a variação da energia pela variação do tempo. Sis-



**Figura 2.12.** Esquema de transformador trifásico estrela-delta (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). Fonte: [1]

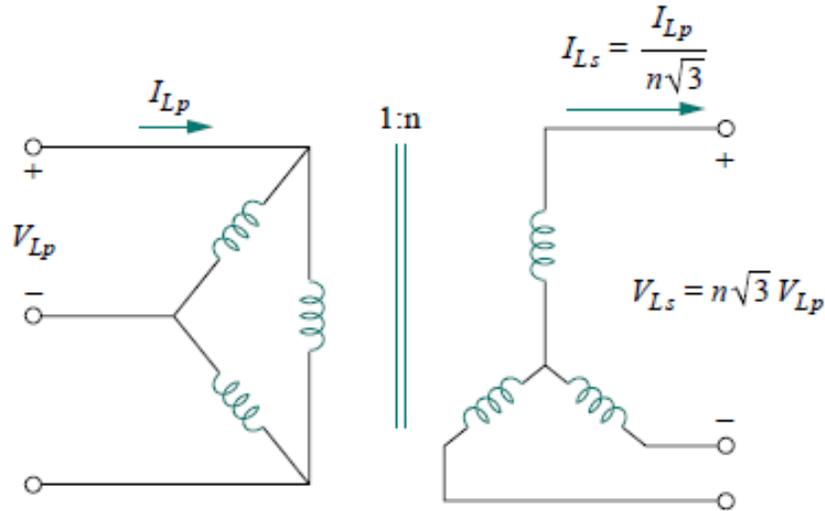
temas elétricos de potência têm como finalidade disponibilizar potência, alimentando dispositivos que funcionam através da transferência de energia elétrica realizada pelas redes de transmissão e distribuição.

Em sistemas de corrente contínua a análise de potência é simplificada, no entanto em sistemas de corrente alternada existem distintas formas de potência, diretamente relacionadas entre si, e todas relevantes na análise de sistemas elétricos, que operam normalmente em corrente alternada [6].

Os parágrafos seguintes da presente seção abordam fundamentos da teoria de eletricidade em circuitos de corrente alternada, identificando e conceituando os principais elementos utilizados nas análises de sistemas de potência. Inicialmente serão abordados os conceitos para sistemas monofásicos, posteriormente sendo apresentadas as questões adaptadas aos sistemas trifásicos, utilizados em sistemas de potência. Estas seções se fundamentam em [6], [9] e [1].

### 2.2.1 Corrente e tensão alternada

Correntes e tensões alternadas são representadas por funções senoidais. Considerando um regime de frequência constante, são necessários dois parâmetros para caracterizar correntes e tensões alternadas: um valor máximo e um ângulo de fase [6]. As expressões (2.7) e



**Figura 2.13.** Esquema de transformador trifásico delta-estrela (valores de tensão e corrente ilustrados representam apenas a magnitude das grandezas). Fonte: [1]

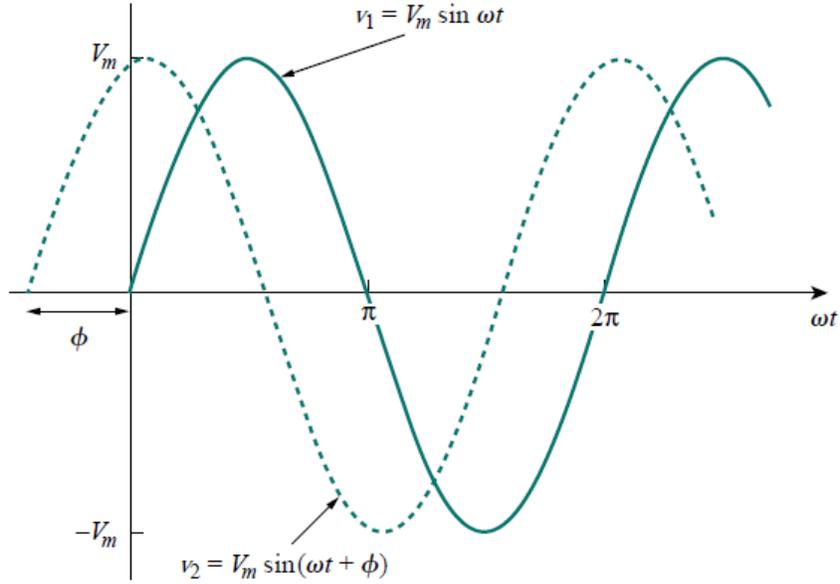
(2.8) mostram a notação comumente utilizada para tensão e corrente, respectivamente. A Figura 2.14 mostra graficamente a defasagem entre tensões.

$$v(t) = V_{max} \cos(\omega t + \delta) \quad (2.7)$$

$$i(t) = I_{max} \cos(\omega t + \beta) \quad (2.8)$$

A dependência temporal da expressão denota o caráter de instantâneo à tensão em (2.7), onde se pode calcular o valor da tensão em um determinado instante de tempo. A parte senoidal da função varia de -1 a 1, o que faz com que a constante que a multiplica corresponda ao valor máximo que a função pode assumir, motivo pelo qual recebe o nome de valor máximo. O ângulo de fase representa a defasagem do pulso senoidal em relação a uma referência, geralmente indicando a defasagem da corrente em relação à tensão.

É usual também trabalhar com o valor eficaz ou RMS (*root mean square*), tanto da tensão como da corrente. Ele é obtido através do quociente entre a tensão ou corrente máxima por  $\sqrt{2}$ . O valor eficaz pode ser interpretado como o valor de tensão ou corrente que provocaria, em termos de potência, os mesmos efeitos em um sistema DC (*direct current*) ou num sistema AC (*alternating current*) submetidos à mesma carga. Além do valor eficaz é comum se trabalhar com o valor médio de tensão e com o valor de pico, conceitos ilustrados graficamente na Figura 2.15.



**Figura 2.14.** Período e defasagem em tensões senoidais. Fonte: [1]

### 2.2.2 Potência instantânea

O produto entre a tensão instantânea nos terminais de uma carga e a corrente instantânea que atravessa a mesma resulta na potência instantânea absorvida por esta carga. Abaixo é desenvolvido o cálculo da potência instantânea para uma carga RLC genérica.

$$\begin{aligned}
 p(t) &= v(t)i(t) = V_{max}I_{max}\cos(\omega t + \delta)\cos(\omega t + \beta) \\
 &= 1/2V_{max}I_{max} \{ \cos(\delta - \beta) + \cos[2(\omega t + \delta) - (\delta - \beta)] \} \\
 &= VI\cos(\delta - \beta) + VI\cos(\delta - \beta)\cos[2(\omega t + \delta)] + VI\sin(\delta - \beta)\sin[2(\omega t + \delta)] \\
 p(t) &= VI\cos(\delta - \beta) \{ 1 + \cos[2(\omega t + \delta)] \} + VI\sin(\delta - \beta)\sin[2(\omega t + \delta)] \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

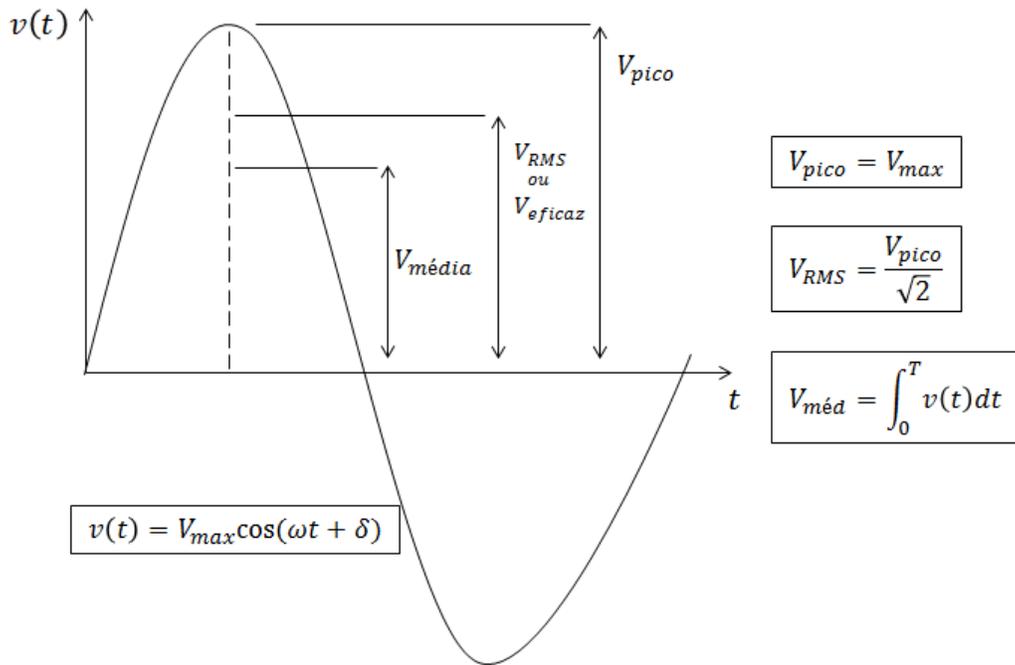
A expressão (2.9) da potência instantânea tem dois termos com significados distintos. O primeiro termo da expressão tem relação com a parte resistiva da carga, enquanto o segundo termo é relacionado à parte reativa da mesma. A expressão da potência instantânea é desmembrada em duas, onde cada espécie de potência é explorada com suas particularidades.

$$p(t) = VI_R \{ 1 + \cos[2(\omega t + \delta)] \} + VI_X \sin[2(\omega t + \delta)] \quad (2.10)$$

$$p_R(t) = VI_R \{ 1 + \cos[2(\omega t + \delta)] \} \quad (2.11)$$

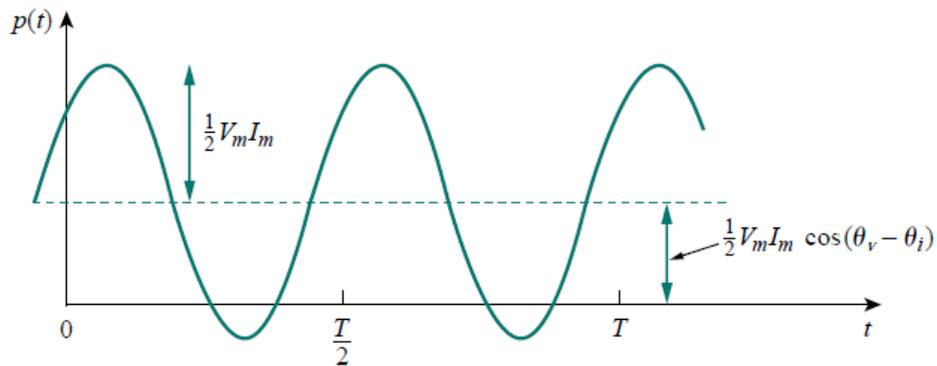
$$p_X(t) = VI_X \sin[2(\omega t + \delta)] \quad (2.12)$$

A potência absorvida pela parte resistiva da carga é destacada na equação (2.11), e nomeada  $p_R(t)$ . A potência absorvida pela parte reativa da carga é destacada na equação



**Figura 2.15.** Tensão RMS, média e de pico. Fonte: fabricação própria.

(2.12), e nomeada  $p_X(t)$ .



**Figura 2.16.** Potência instantânea entrando num circuito. Fonte: [1]

### 2.2.3 Potência real ou potência ativa

A potência real é o valor médio assumido pela função que descreve a parte resistiva da potência instantânea  $p_R(t)$ .

$$P = VI_R = VI \cos(\theta_V - \theta_I) [W] \quad (2.13)$$

A potência média é a que usualmente se mede, utilizando um wattímetro por exemplo. A potência instantânea varia com o tempo, portanto caso fossem feitas medições aleatórias seriam obtidos valores hora positivos, hora negativos. Isso significa que por alguns instantes a fonte fornece, e por outros ela absorve energia, o que ocorre graças à presença no circuito de elementos que armazenam energia, os capacitores e os indutores.

### 2.2.4 Potência reativa

A potência reativa, analogamente ao que define a potência ativa, é o valor médio assumido pela função que descreve a parte reativa da potência instantânea  $p_X(t)$ .

$$Q = VI_X = VI \text{sen}(\theta_V - \theta_I) [\text{var}] \quad (2.14)$$

É a parte da potência absorvida pelos elementos da carga com característica reativa, sejam indutores, capacitores, ou uma combinação destes. Deseja-se que a parte reativa da potência seja a menor possível, uma vez que ela guarda uma proporção inversa em quantidade com a potência ativa, a qual se deseja que seja maior possível. A relação entre as potências ativa e reativa é ilustrada pelo conceito de potência aparente e fator de potência.

### 2.2.5 Potência aparente

A potência aparente é definida com o produto dos valores RMS de tensão e corrente, sendo ilustrada na expressão da potência ativa.

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_V - \theta_I) = S \cos(\theta_V - \theta_I) \quad (2.15)$$

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (2.16)$$

Ela é a potência ativa que se esperaria, intuitivamente, levando em conta o cálculo de potência num sistema DC. O termo senoidal da expressão da potência ativa é quem ajusta o valor aparente de potência para o valor real, sendo um fator de proporção que divide a potência aparente em potência ativa e potência reativa. Este é o chamado Fator de Potência.

### 2.2.6 Fator de potência

O fator de potência é definido como o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

$$FP = \cos(\theta_V - \theta_I) \quad (2.17)$$

Retomando a expressão da potência ativa constante nas expressões (2.15) e (2.16), é possível chegar a outra expressão para o cálculo do fator de potência:

$$P = S \cos(\theta_V - \theta_I) \longrightarrow \cos(\theta_V - \theta_I) = P/S$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.18)$$

A expressão (2.18) recupera a ideia de proporção que o fator de potência representa, de forma que quanto mais ele se aproxima da unidade, menor será a parcela de potência reativa na carga em questão.

O fator de potência pode se dizer atrasado ou adiantado, dependendo da característica da carga. Caso prevaleça a característica capacitiva, a corrente estará adiantada em relação à tensão, e o fator de potência é dito adiantado. Caso contrário, prevalecendo a característica indutiva na carga, a corrente estará atrasada em relação à tensão, e o fator de potência é dito atrasado.

## 2.2.7 Potência complexa

A potência complexa reúne todas as informações a respeito da potência absorvida por uma determinada carga. Matematicamente é obtida através do produto do fasor de tensão pelo conjugado do fasor de corrente.

$$S = \frac{1}{2} V I^* \quad (2.19)$$

É usual trabalhar em valores RMS no lugar dos valores máximos. É usual também tratar a potência complexa como uma grandeza fasorial, assim como se faz com a tensão e a corrente, produzindo a seguinte expressão:

$$S = V_{rms} I_{rms}^*$$

$$V_{rms} = \frac{V}{\sqrt{2}} = V_{rms} \angle \theta_V$$

$$I_{rms} = \frac{I}{\sqrt{2}} = I_{rms} \angle \theta_I$$

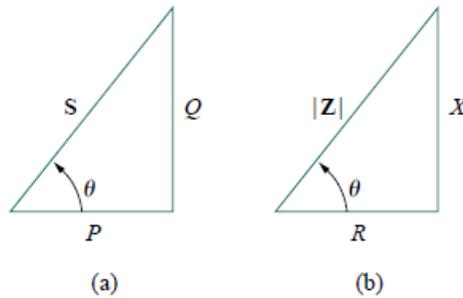
$$S = V_{rms} I_{rms} \angle (\theta_V - \theta_I)$$

$$S = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_V - \theta_I) + j V_{rms} I_{rms} \sen(\theta_V - \theta_I) \quad (2.20)$$

O módulo da potência complexa é a potência aparente, e o ângulo de fase da potência complexa é o próprio fator de potência. Observando individualmente os termos da expressão (2.20), percebe-se que o primeiro (parte real) corresponde à potência ativa, enquanto o segundo (parte imaginária) corresponde à potência reativa, transformando a expressão da forma polar para a retangular.

$$S = P + jQ \quad (2.21)$$

O chamado triângulo de potências é uma ferramenta gráfica baseada na relação (2.21) que facilita a visualização de todos os parâmetros que compõem a potência complexa, reunindo as informações evidenciadas na forma polar e na forma retangular. Análogo ao triângulo de potências é o triângulo de impedâncias, que também relaciona as grandezas que compõem a impedância complexa de forma pitagórica.



**Figura 2.17.** Triângulo de potências (a) e triângulo de impedâncias (b). Fonte: [1]

Partindo da análise do triângulo de potências é possível obter algumas expressões que relacionam as grandezas entre si. Algumas destas expressões constam a seguir.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.22)$$

$$(\delta - \beta) = \tan^{-1}(Q/P) \quad (2.23)$$

$$Q = P \tan(\delta - \beta) \quad (2.24)$$

$$FP = \cos(\delta - \beta) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.25)$$

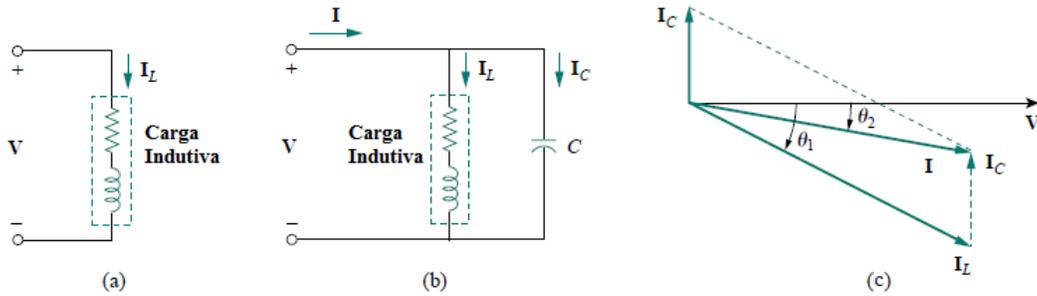
### 2.2.8 Correção do fator de potência

A maior parte das cargas alimentadas por energia elétrica, tanto cargas domésticas quanto industriais, tem caráter predominantemente indutivo. Como anteriormente descrito, cargas indutivas operam com corrente defasada em relação à tensão, portanto têm fator de potência atrasado.

Como é ilustrado pelo conceito do próprio fator de potência, o que se deseja é que este seja o mais próximo da unidade, de forma que a parcela de potência reativa seja a menor possível. Logo, se possível, é interessante alterar o fator de potência de uma carga, aproximando-o

da unidade. Intuitivamente é possível perceber que isso pode ser feito diminuindo o caráter indutivo da carga.

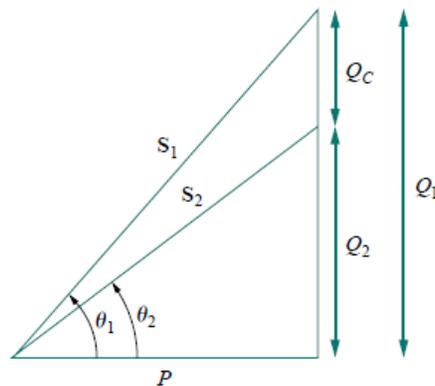
A diminuição do caráter indutivo é realizada através da ligação de bancos de capacitores em paralelo com a carga, conforme representa a Figura 2.18.



**Figura 2.18.** Carga indutiva (a); Ligação de capacitor para correção de fator de potência (b); visualização do efeito da ligação do capacitor através de um diagrama fasorial (c). Fonte: [1]

Existe ainda a possibilidade de uma carga ter predominância de característica capacitiva, situação resolvida de forma análoga à que se corrige o fator de potência indutivo: conectando um indutor à carga.

O efeito observado após a adoção desse tipo de procedimento fica mais claro quando ilustrado através do triângulo de potências. Tomando como exemplo a correção de fator de potência por conexão de banco de capacitores, tem-se a Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Triângulo de potências ilustrando correção de fator de potência. Fonte: [1]

A Figura 2.19 apresenta com índice 1 as grandezas antes da correção e com índice 2 os valores depois da correção. É possível observar que a alteração do fator de potência diminui

a potência aparente, apesar de manter a parcela de potência ativa constante. A diminuição na potência aparente é correspondente apenas à queda na parcela de potência reativa.

## 2.3 Perdas

A presente seção aborda conceitos relacionados a perdas de energia dentro de circuitos elétricos, elencando os principais tipos de perdas e tratando aspectos básicos. Além disso, aborda as possibilidades de evitar ou mitigar esses efeitos, de forma a melhorar a eficiência energética de um sistema de distribuição ou transmissão de energia elétrica.

### 2.3.1 Perda ôhmica

A primeira Lei de Ohm afirma que a razão entre a tensão e a corrente num dado condutor é constante, e dá a essa constante o nome de resistência elétrica. Essa lei é representada matematicamente pela expressão mais elementar do estudo de circuitos elétricos, onde  $V$  representa a diferença de potencial elétrico entre dois pontos, dada em volts,  $I$  representa a corrente elétrica que passa pelo condutor, dada em ampères, e  $R$  representa a resistência elétrica, dada em ohms:

$$\frac{V}{I} = R \quad (2.26)$$

A segunda Lei de Ohm aprofunda o conhecimento em relação ao condutor, relacionando o nível de resistência elétrica a uma proporção direta em relação à resistividade elétrica do material do condutor ( $\rho$ ) e ao comprimento do condutor ( $l$ ), e a uma proporção inversa em relação à área de seção do condutor ( $A$ ). Matematicamente, a segunda Lei de Ohm é enunciada por:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.27)$$

A potência elétrica (previamente detalhada em termos de potência instantânea e potência complexa e trifásica), em nível de circuitos de primeira ordem, é relacionada ao produto entre a tensão elétrica e a corrente elétrica. Manipulando a expressão proveniente da primeira Lei de Ohm, chega-se à relação:

$$P = VI \rightarrow V = RI \rightarrow P = RI^2 \quad (2.28)$$

Portanto, para uma carga resistiva, sabe-se que a potência absorvida pela carga é proporcional à resistência desta carga e ao quadrado da corrente que a atravessa. O que ocorre é

que o condutor não é ideal, portanto da mesma forma com que uma carga resistiva consome potência, um condutor real também consome (tanto mais potência consumida quanto maior forem sua resistividade e comprimento e quanto menor for sua seção, conforme a segunda Lei de Ohm).

A potência consumida pelo condutor não é potência útil, como a consumida por uma carga resistiva. É na realidade uma parcela de potência dissipada na forma de calor, sem utilização em termos práticos dentro do circuito elétrico, cuja função primordial é alimentar uma carga. Essa potência dissipada é denominada Perda Ôhmica.

### 2.3.2 Perda associada a potência reativa

Conforme é mostrado na subseção 2.2.7, a expressão (2.21) relaciona a chamada potência complexa em termos de uma parcela de potência ativa e uma parcela de potência reativa. Como foi dito anteriormente, deseja-se que a parcela de potência reativa seja a menor possível, de forma a minimizar as perdas que decorrem da existência da mesma.

O triângulo de potências (Figura 2.17 e Figura 2.18) mostra que, para determinado módulo de tensão e de corrente dados, é possível maximizar a entrega de potência ativa à carga através de correção de fator de potência. No entanto, essa não é a única maneira com que indutâncias e capacitâncias influenciam em termos de eficiência de transmissão de potência elétrica.

Capacitores e indutores, através de seus mecanismos de armazenamento e liberação de energia, conferem ao fluxo energético a característica da alternatividade. Hora fornecem potência, hora consomem potência - de maneira que em termos quantitativos não influenciam na quantidade final de entrega de potência, pois consomem e fornecem na mesma quantidade.

Apesar de não influenciar significativamente em termos quantitativos de entrega de potência em si, a análise deve ir além dessa questão. A energia do circuito alimenta o processo de armazenamento e liberação dos dispositivos e, além disso, o simples fato de haver troca energética com fluxo reversível e cíclico representa uma parcela de perda justificada pela segunda lei da Termodinâmica e o conceito de entropia. A seção seguinte aborda a entrega de potência, ilustrando a influência da característica reativa da carga na eficiência do processo de transmissão de eletricidade.

### 2.3.3 Entrega de potência em sistemas com cargas ativas e reativas

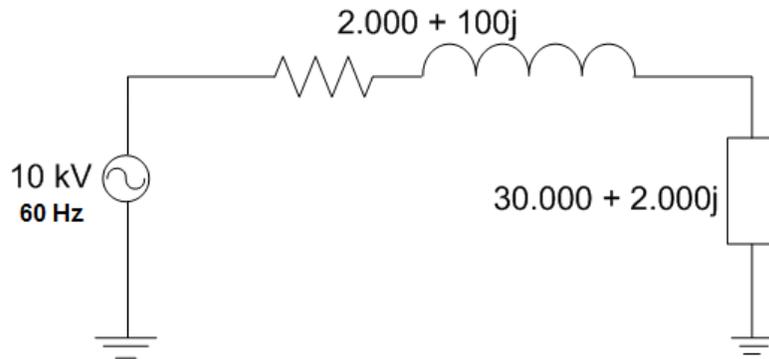
A eficiência de um sistema de transmissão de energia elétrica envolve duas grandezas a saber: a quantidade de potência disponibilizada na geração (entrada) e a quantidade de potência

entregue às cargas (saída). O cálculo dessa eficiência é realizado pela tradicional expressão de eficiência de processos:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.29)$$

O cálculo da potência é realizado através das expressões revisadas no tópico 2.2.7, no seção anterior do presente capítulo. Ilustrar potência disponível e potência entregue é possível através de uma simulação de um circuito elétrico, tarefa que será mostrada a seguir. O sistema desenvolvido ao longo do trabalho foi utilizado para esta simulação, e nas seções seguintes o mesmo terá sua estrutura e seu funcionamento abordado detalhadamente.

A planta proposta para a simulação é bastante básica, e tem como finalidade apenas ilustrar os motivos pelos quais não é possível transmitir toda a potência gerada até as cargas a serem alimentadas.



**Figura 2.20.** Representação gráfica unifilar do circuito trifásico simulado. Fonte: fabricação própria.

A Figura 2.20 mostra a representação de uma fase do circuito, onde a fonte de entrada e a carga são conectadas na configuração estrela. O circuito conta, em cada fase, com uma fonte de tensão na entrada, uma impedância central representando a linha, e uma impedância na saída representando a carga. A simulação foi realizada com variações da impedância da linha, de forma a observar a variação da eficiência em função dessa alteração.

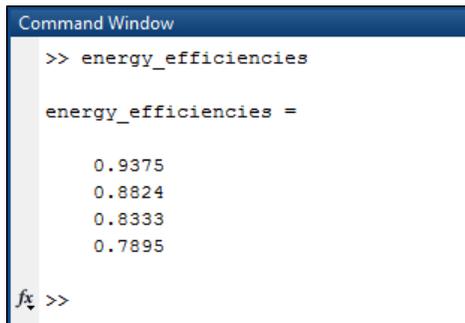
É esperado que nos casos onde a linha represente maior perda, a eficiência seja menor. Isso ocorre, no exemplo simples em questão, por conta da maior queda da tensão que uma carga de impedância mais alta representa. A Figura 2.21 mostra os comandos necessários para a declaração dos elementos que compõem o circuito. A Figura 2.22 mostra a tela de comando do MatLab® com os resultados de eficiência calculados para cada linha proposta. A Tabela 2.1 mostra os valores de impedância de linha correspondentes às eficiências calculadas pelo sistema.

```

1 - clear all; close all; clc
2
3 - netlist = {};
4 - netlist = netlistaddsource_triphas_star(netlist, 'vin', 'A', '0', 10e+3);
5 - netlist = netlistaddimpedance_triphas(netlist, 'zline', 'A', 'B',...
6     2e+3 + 1e+3 *1i);
7 - netlist = netlistaddimpedance_triphas_star(netlist, 'zload','B', '0',...
8     30e+3 + 2e+3 * 1i);
9
10  %-----Calculating energy efficiency-----
11
12 - [best_values, energy_efficiencies, I, load_voltages] = ...
13  evaluate_all_controllable_configurations...
14  (netlist, {'zline'}, ...
15  {@netlistaddimpedance_triphas}, ...
16  {'zline'; 'A'; 'B'; 'XX'}), ...
17  {{2e+3 + 1e+3 *1i; 4e+3 + 1e+3 *1i; 6e+3 + 1e+3 *1i; 8e+3 + 1e+3 *1i}}, ...
18  {'vin_phase1'; 'vin_phase2'; 'vin_phase3'}, ...
19  {'A_phase1'; 'A_phase2'; 'A_phase3'}, ...
20  {'0'; '0'; '0'}, ...
21  {'zload_phase1'; 'zload_phase2'; 'zload_phase3'}, ...
22  {'B_phase1'; 'B_phase2'; 'B_phase3'}, ...
23  {'0'; '0'; '0'}, ...
24  60);
25

```

Figura 2.21. Comandos de entrada para descrição do circuito e cálculo da eficiência.



```

Command Window
>> energy_efficiencies

energy_efficiencies =

    0.9375
    0.8824
    0.8333
    0.7895

fx >>

```

Figura 2.22. Tela de comando do MatLab<sup>®</sup> com os valores de eficiência calculados.

O caso em questão promove variações apenas na parte resistiva da carga, de modo a observar a queda na eficiência em termos de potência ativa. A fonte de entrada foi mantida constante, assim como a carga alimentada. Conforme observa-se na Tabela 2.1, a eficiência diminui quando a parte resistiva da impedância da linha é aumentada, devido a uma maior perda energética ao longo da linha.

## 2.4 O simulador de circuitos SPICE

O SPICE é uma ferramenta de uso bastante difundido quando se trata de simulação de circuitos elétricos. É um software de código aberto, propiciando a existência de diversas

**Tabela 2.1.** Variação da eficiência em função da impedância de linha

Impedância [ $\Omega$ ]	Eficiência
$2000 + 1000j$	0,9375
$4000 + 1000j$	0,8823
$6000 + 1000j$	0,8333
$8000 + 1000j$	0,7894

distribuições adaptadas para usos distintos dentro do universo dos circuitos.

São requisitados pelo software alguns dados de entrada para que seja realizada a simulação, e [7] enumera esses requisitos como:

1. Descrição do circuito: listar e organizar os elementos que compõem o circuito a ser analisado, contendo todos seus elementos, fontes, polaridades e etc.
2. Especificação da análise: definir o tipo da análise, dizendo ao software se o interesse é uma análise DC, transiente, etc.
3. Especificação dos resultados: definir o tipo de resultado que se espera, como lista de dados, tabelas, gráficos, etc.

Os dados de entrada são inseridos por meio de uma *netlist*, que é um arquivo produzido num gerenciador de texto e com extensão própria (CIR, SPICE, etc.).

### 2.4.1 Descrição do circuito no SPICE

Ao descrever o circuito a ser simulado, basicamente se enumera os elementos se atribui parâmetros a cada um deles. Ainda segundo [7], cada elemento é especificado por uma declaração de elemento. Na declaração se tem como padrão iniciar pelo nome do elemento, seguido dos nós do circuito ao qual ele está conectado, e então os parâmetros aos quais ele está submetido, variando a entrada esperada para cada tipo de elemento em questão. A Tabela 2.2 mostra o padrão de sintaxe de cada tipo de elemento.

**Tabela 2.2.** Sintaxes para declaração de elementos

Componentes	Identificação	Nós	Valores
Resistor	Rxxx	N+ N-	VALOR
Capacitor	Cxxx	N+ N-	VALOR
Indutor	Lxxx	N+ N-	VALOR
Fonte de tensão	Vxxx	N+ N-	ATRIBUTOS
Fonte de corrente	Ixxx	N+ N-	ATRIBUTOS

No campo ‘Nós’ a entrada deve ser o nome dos nós entre os quais o elemento se situa, convencionando a primeira entrada como o nó de polaridade positiva e a segunda como o de polaridade negativa. Também por convenção, a entrada ‘0’ define o nó como referência (terra).

Em relação a resistores, indutores e capacitores, à entrada ‘VALOR’ automaticamente é atribuída a unidade SI (Sistema Internacional) da grandeza correspondente ao elemento. Os fatores multiplicadores são indicados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3.** Fatores multiplicadores.

Sufixo indicativo	Prefixo métrico	Fator multiplicador
T	tera	$10^{12}$
G	giga	$10^9$
Meg	mega	$10^6$
K	quilo	$10^3$
M	mili	$10^{-3}$
U	micro	$10^{-6}$
N	nano	$10^{-9}$
P	pico	$10^{-12}$
F	fento	$10^{-15}$

A declaração de fontes tem o campo ‘ATRIBUTOS’, que espera diferentes entradas de informação, dependendo do tipo de fonte. A Tabela 2.4 mostra as entradas esperadas, e os fatores multiplicadores de unidades utilizados são os mesmo mostrados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.4.** Sintaxe para atributos de fontes

Tipo de fonte	Atributos
DC	DC valor dc
Senoidal	sin(offset amplitude frequência tempinício)

A inserção de um transformador num circuito montado no SPICE é feita através da ligação de indutâncias acopladas e a declaração de um fator de acoplamento ‘k’, onde o fator de transformação do transformador é definido pela relação entre as indutâncias seguindo a expressão  $V_2/V_1 = \sqrt{L_2/L_1}$ .

### 2.4.2 Especificação do tipo de análise no SPICE

A especificação do tipo de análise a fazer é a penúltima etapa da montagem do *netlist*. Nela se define se análise simulada será em corrente contínua (DC), corrente alternada (AC) ou Transiente. A linha neste caso é iniciada com um ponto, informando ao software que se trata

de um comando de especificação de análise. A Tabela 2.5 mostra os comandos utilizados para cada um desses tipos de análise.

**Tabela 2.5.** Sintaxe para especificação de tipo de análise

Análise solicitada	Comando
Corrente contínua	.DC nome valor.inicial valor.final valor.passo
Corrente alternada	.AC DEC pontos.decada freq.inicial freq.final
Transiente	.TRAN passo.de.tempo tempo.final

O comando *.DC* procede a chamada ‘varredura de corrente contínua’, determinando a curva característica do circuito de maneira mais prática, variando a fonte automaticamente. É utilizado quando se trabalha com fontes de tensão DC, onde não faz sentido analisar resposta em frequência e nem o transitório. As entradas necessárias são o nome da fonte DC que será variada, valores inicial e final de variação da fonte e o passo.

A resposta em frequência é analisada com o comando *.AC*. As entradas necessárias são o espaçamento logarítmico entre os pontos, definindo *DEC* para década e *OCT* para oitava. Após isso, define-se quantos pontos se deseja por década (ou oitava), e a frequência final e inicial da simulação.

O transitório pode ser observado utilizando o comando *.TRAN*, onde o SPICE calcula as variáveis em função do tempo. Por padrão a simulação se inicia no tempo zero, portanto só é necessário informar ao software o passo de tempo e o tempo final desejados.

### 2.4.3 Especificação dos resultados no SPICE

Basicamente é possível imprimir ou plotar dados de saída diretamente com o SPICE. Os comandos são bastante simples, bastando indicar a saída desejada e especificar a variável que se quer observar. A Tabela 2.6 mostra os comandos necessários para cada saída.

**Tabela 2.6.** Sintaxe para especificação de saída de resultado

Saída solicitada	Comando
Imprimir pontos em análise DC	.PRINT DC var.desejada
Imprimir pontos em análise AC	.PRINT AC var.desejada
Imprimir pontos em análise Transiente	.PRINT TRAN var.desejada
Plotar pontos em análise DC	.PLOT DC var.desejada (lim.sup lim.inf)
Plotar pontos em análise AC	.PLOT AC var.desejada (lim.sup lim.inf)
Plotar pontos em análise Transiente	.PLOT TRAN var.desejada (lim.sup lim.inf)

## 3 Metodologia

O sistema proposto é composto por quatro níveis, que serão apresentados individualmente neste capítulo. Cada um dos níveis é composto por códigos de comando em MatLab<sup>®</sup> que executam tarefas no SPICE, gerando uma base de comunicação entre os softwares que permite que o usuário opere o sistema por completo usando apenas a interface MatLab<sup>®</sup>.

Inicialmente, na seção ‘Desenvolvimento’, serão apresentados os códigos das funções geradas, e será explicitado o funcionamento do sistema. A segunda seção, ‘Procedimentos experimentais’, descreve os testes que serão realizados. Finalmente, a terceira e última seção, intitulada ‘Metodologia de análise’ mostra o que se espera observar com os testes, e quais conclusões se espera obter a partir da experimentação proposta.

Prezando por uma melhor formatação e disposição do texto ao longo do capítulo, todas as imagens citadas constam no final do mesmo, em sequência e devidamente referenciadas.

### 3.1 Desenvolvimento da metodologia

Antes da definição da metodologia adotada para o trabalho, foi feita uma busca por referências de trabalhos em sistemas com o mesmo fim: analisar desempenho de sistemas de potência. Em [12] é mostrado quão poderoso é o SPICE enquanto ferramenta de simulação, sendo apresentado um software de análise de circuito totalmente baseado neste. Em [2] se tem o SPICE trabalhando em análise de sistemas de potência envolvendo inclusive aplicações em Redes Inteligentes. E em [14] se tem um sistema cuja ideia da simplificação da operação do sistema para o usuário se aproxima bastante da proposta pelo presente trabalho.

O desenvolvimento da metodologia também se fundamentou em guias de utilização dos softwares envolvidos no sistema proposto, o SPICE [10] e o MatLab<sup>®</sup> [15] [11], além de obras da área de eletricidade que contém exemplos de aplicação [10].

Esta seção aborda o desenvolvimento do código das funções que compõem cada nível do sistema, bem como a finalidade específica dos mesmos, destacando detalhando os principais trechos dos códigos.

#### 3.1.1 Nível 1: criação e leitura de arquivo tipo *netlist*

A finalidade do primeiro nível é a criação, leitura e modificação de circuitos, via *netlist*. É um nível preparatório, que acontece antes de qualquer simulação de circuito propriamente dita.

A ideia é criar uma planta a partir da interface MatLab<sup>®</sup>, que através dos comandos das funções internas gera o arquivo de descrição de circuito no formato SPICE. Além disso, também é possível criar a planta diretamente no SPICE e importá-la como o modelo criado de descrição de circuito para MatLab<sup>®</sup>.

Utilizar as funções MatLab<sup>®</sup> auxilia bastante na etapa de descrição do circuito, poupando diversas linhas de comando. A vantagem ficará explícita ao longo da demonstração das funções, que serão procedidas nas subseções a seguir.

- Função *generate basic netlist file*:

O código da função é exibido na Figura 3.1. É a função responsável por criar o arquivo *netlist* no modelo esperado pelo SPICE. Os comandos fazem com que seja aberto um arquivo (linhas 5 a 10), sejam gravadas dentro dele as informações que descrevem o circuito e as especificações da simulação (linhas 19 a 24), e que o arquivo seja salvo.

- Função *netlist2matlab*:

O código da função é exibido na Figura 3.2. A função *netlist2matlab* transformar um arquivo tipo *netlist* no modelo SPICE para um arquivo de descrição de circuito no modelo desenvolvido para MatLab<sup>®</sup>. A partir da definição do arquivo (linhas 5 a 8) ele executa o comando de conversão do conteúdo (linhas 12 a 20).

- Função *netlist add*:

O código da função é exibido na Figura 3.3. A função opera o comando básico de inserção de elementos numa *netlist*. A função *netlist add* é utilizada em todas as outras funções de montagem de planta, e será vista em todos os outros códigos desta seção.

- Função *netlist add impedance*:

O trecho principal do código da função é exibido na Figura 3.4. A função é a responsável por simplificar substancialmente o procedimento de inserção de uma impedância numa *netlist*, de forma que com a entrada da impedância na forma retangular ( $Z = R + jX$ , com o usuário fornecendo os valores de R e X) a função se encarrega de descrever a reatância (capacitiva ou indutiva) e a resistência nos moldes esperados pelo simulador, poupando diversas linhas de comando na descrição de um circuito, principalmente no caso trifásico. o trecho entre as linhas 22 e 32 do código mostrados na Figura 3.4 mostra o laço que atribui à reatância declarada o valor de capacitância ou indutância, no modelo esperado pelo *netlist* do SPICE.

Também foi desenvolvida a função *netlist add impedance triphase*, e ela utiliza a função *netlist add impedance* para montar uma impedância trifásica. A estratégia de montagem da impedância trifásica é a mesma mostrada na Figura 3.8.

Ainda em relação a impedâncias, foram criadas as funções *netlist add impedance triphase star* e *netlist add impedance triphase delta*. As funções são responsáveis, respectivamente, pela criação de impedâncias trifásicas do tipo estrela e delta. Ambas utilizam internamente a função principal de adição de impedância, mas já conectando as três fases na configuração desejada de maneira simples e rápida. A Figura 3.5 mostra as entradas necessárias para a adição de impedâncias trifásicas estrela e delta num *netlist*.

- Função *netlist add source triphase star*:

O trecho principal do código da função é exibido na Figura 3.6. A função insere no *netlist* uma fonte AC trifásica estrela (Y), esperando de entrada o primeiro nó e o nó referência. O usuário define o primeiro nó como ‘A’, e automaticamente a função gera os nós trifásicos ‘A1’, ‘A2’ e ‘A3’(linhas 16 a 26).

- Função *netlist add transformer triphase star star*:

O trecho principal do código da função é exibido na Figura 3.7. A função *netlist add transformer triphase star star* cria na planta um transformador trifásico estrela-estrela (Y-Y), sendo esta mais uma função que possibilita uma grande diminuição de linhas de comando em relação à descrição de circuito apenas pelo SPICE.

A função pede como entrada a identificação do transformador adicionado (nome), os nós (trifásicos) aos quais ele está conectado, a indutância dos enrolamentos do primário, o fator de transformação (através do qual é calculada a indutância dos enrolamentos do secundário) e as resistências 1 e 2 (primário e secundário, respectivamente) que representam as perdas inseridas no circuito devido à conexão do transformador.

De maneira similar foram desenvolvidas as funções ‘*netlist add transformer triphase star-delta*’, ‘*netlist add transformer triphase delta-star*’ e ‘*netlist add transformer triphase delta-delta*’, responsáveis por criar nos netlists as demais configurações possíveis de transformadores trifásicos (estrela-delta, delta-estrela e delta-delta, respectivamente).

- Função *netlist add vnull triphase*:

O código da função é exibido na Figura 3.8. O objetivo da função é inserir fontes de tensão nulas em todas as fases do circuito, de modo a poder realizar medições de corrente elétrica, de acordo com o procedimento previamente descrito no capítulo da fundamentação

teórica. Basicamente, são adicionadas fontes em série com as linhas de cada fase, onde a entrada esperada pela função é apenas a identificação do elemento e os nós entre os quais se deseja inserir os medidores.

### 3.1.2 Nível 2: comandos de simulação de MatLab<sup>®</sup> para SPICE

O Nível 2 tem como objetivo possibilitar que os parâmetros da simulação sejam configurados e gerenciados via MatLab<sup>®</sup> que através do conjunto de funções que compõem o nível em questão, dá os comandos para que o SPICE execute a simulação.

Assim como no Nível 1, a interação do MatLab<sup>®</sup> com o SPICE traz novas possibilidades, graças aos recursos oferecidos pelo primeiro. Como exemplo de vantagem, é possível utilizar as linhas de comando do MatLab<sup>®</sup> para trabalhar com os resultados obtidos pela simulação, gerando gráficos e realizando operações com os mesmos.

A seguir, são listadas e demonstradas as funções desenvolvidas para definição de método de análise para SPICE via MatLab<sup>®</sup>.

- Análise AC

O trecho principal do código da função é exibido na Figura 3.9. A função adiciona ao *netlist* os comandos de análise AC, abrindo um arquivo existente (previamente criado no código, na etapa das especificações do circuito) e descrever o tipo de análise que se deseja. A função pede como entrada o número de frequências por década em que se deseja simular, as frequências inicial e final, o valor de saída que se deseja observar e, de forma opcional, o nome do arquivo que de saída com os registros dos resultados da simulação.

- Análise DC

O trecho principal do código da função é exibido na Figura 3.10. É análoga ao que realiza a função, mas para uma análise DC. As entradas esperadas são a identificação da fonte que será variada para a varredura, os valores inicial e final, o passo, e o arquivo de saída de dados, também opcional.

- Análise Transiente

O trecho principal do código da função é exibido na Figura 3.11. Também é função análoga às duas outras responsáveis pela definição de modelo de análise. Espera com entrada o passo de simulação, os tempos final e inicial, e o nome do arquivo de saída de dados, opcional.

### 3.1.3 Nível 3: controle de alterações de configuração

O Nível 3 é responsável por gerenciar as alterações na configuração da planta. Ele permitirá que o usuário defina quais elementos de circuito sofrerão variação ao longo da simulação e que ele defina se as alterações são controláveis ou não controláveis.

Alterações não controláveis tem por finalidade representar as variações de cenário que podem ocorrer num sistema de transmissão/distribuição real e que o operador do sistema não tem controle ou aviso prévio da ocorrência das mesmas. Exemplos de alterações desse tipo são: quedas de linhas, queda de fases, desligamento de transformadores e ligação de cargas clandestinas.

As alterações controláveis tem por objetivo representar os parâmetros que podem ser controlados pelo operador do sistema, onde ele decide se o dispositivo fica ligado ou desligado, ou em maior ou menor nível. Deseja-se representar as alterações de entrada de potência, ligação de banco de capacitores, retirada de cargas e ligação de linhas alternativas que o operador pode proceder no sistema.

A ideia final é que, para cada configuração nova proveniente de alterações não controláveis, o sistema indique entre as possíveis alterações controláveis qual retorna melhor desempenho em termos de potência. Portanto, o Nível 3 do sistema receberá como entrada os elementos que são variáveis dentro da planta, os valores que eles podem assumir, e a classificação da alterabilidade como controlável ou não controlável. Ele fará as alterações no *netlist*, deixando pronto para que o Nível 4 faça o trabalho final: a avaliação da eficiência energética e a comparação dos resultados obtidos.

As funções que operam no Nível 3 são:

- Função *netlist replace element value*:

É a função que altera o valor de um dos parâmetros declarados inicialmente, no *netlist* original. É possível alterar a magnitude de uma fonte de tensão, o valor de uma impedância e o fator de transformação de um transformador, por exemplo. A Figura 3.12 mostra as entradas necessárias para a utilização da função: o nome do elemento, a função que adiciona o elemento, e os possíveis valores que ele pode assumir.

A Figura 3.13 ilustra o uso da função para uma hipotética impedância ‘zline’: na linha 11 é informada a função que adiciona a impedância, e na linha 12 as entradas do elemento - identificando com ‘XX’ o parâmetro que sofrerá as alterações. Na linha 13 são listadas, dentro de um vetor, as possibilidades de valor que o parâmetro ‘XX’ poderá assumir.

- Função *netlist remove element*:

É uma função utilizada nos casos em que se deseja apenas remover um elemento do circuito, ao invés de alterar valor de algum parâmetro ou mesmo substituí-lo por outro elemento ligado aos mesmos nós. Será utilizada nos casos de queda de uma linha de transmissão, queda de uma fase de uma linha ou retirada de um transformador da planta, por exemplo.

Sua utilização é bastante simples, bastando como entradas a identificação do *netlist* onde será operada a retirada e do elemento a ser retirado do circuito.

- Funções de adição de impedâncias (família *netlist add impedance*):

As funções que inserem impedâncias monofásicas, trifásicas, trifásicas delta e trifásicas estrela, todas componentes do Nível 1 do sistema, também serão utilizadas como parte do Nível 3. Elas serão as responsáveis por inserir, por exemplo, cargas clandestinas na planta. Estas funções podem ser operadas dentro de laços com elementos de decisão pseudoaleatória e atribuição de probabilidade de ocorrência (usando, por exemplo, a função nativa do MatLab® ‘*randn*’).

### 3.1.4 Nível 4: análise de eficiência energética e escolha de melhor possibilidade de configuração

O Nível 4 do sistema implementa a variação dos cenários de operação não controláveis, de maneira a gerar possibilidades diversas através de alterações de configuração aleatórias ou probabilísticas, e verifica qual dentre as possibilidades de configurações controláveis é capaz de transmitir potência com mais eficiência.

Para isso, o Nível 4 conta com duas funções principais, que são descritas a seguir.

- Função *evaluate energy efficiency*:

A função ‘*evaluate energy efficiency*’ retorna ao usuário a potência de entrada, a potência de saída e a eficiência energética do circuito descrito pelo *netlist* entregue. Para tanto, além das informações do circuito contidas no *netlist* é necessário que o usuário forneça informações que identifiquem as entradas e as saídas de potência da planta.

O cálculo das potências de entrada e saída deve levar em conta a questão das polaridades das tensões, de maneira que seja devidamente convencionado e atendido o conceito de potência fornecida e potência consumida. Conforme observa-se na Figura 3.14, no trecho superior da imagem estão as entradas esperadas pela função: o *netlist*, uma lista com os nomes das entradas, listas com os nomes dos nós positivos e negativos das entradas, uma lista com os nomes das saídas (cargas) e listas identificando os nós de polaridade positiva e negativa

destas saídas. A entrada da frequência é facultativa caso se opere no padrão estabelecido de 60 Hz.

O trecho inferior da Figura 3.14 mostra um exemplo de utilização da função: inicialmente é informado o *netlist* e então são informadas como entradas as três fases de uma fonte de tensão ‘*vin*’, com suas respectivas listas de nós positivos e em seguida de nós negativos. Depois, é informada como saída a carga ‘*zload*’ em suas três fases, e em seguida as listas de nós positivos e negativos.

- Função *evaluate all controllable configurations*:

A função ‘*evaluate all controllable configurations*’ utiliza as funções do Nível 3 juntamente à função ‘*evaluate energy efficiency*’ para alcançar o propósito maior do sistema: avaliar a eficiência energética em uma planta e indicar, dentre as configurações controláveis disponíveis, qual é melhor em termos de eficiência.

As entradas esperadas pela função e um exemplo de utilização da mesma estão na Figura 3.15. A parte superior da imagem mostra as entradas esperadas, que devem ser relacionadas com os comando mostrados na parte inferior. Na linha 43, após informar o *netlist* tem-se a lista dos elementos controláveis da planta. Depois, na linha 44, são informadas as funções de adição de elemento que serão utilizadas – no caso de manter o elemento e alterar parâmetros internos, basta repetir a função utilizada no *netlist* original. Caso contrário, o usuário deve declarar a função de adição do elemento que ele deseja que seja colocado no lugar do elemento listado na linha 43.

Na linha 45 são informadas as entradas tradicionais de cada elemento, como se o usuário estivesse dando as entradas de um elemento para um *netlist* novamente, com a diferença de que desta vez ele identificará o parâmetro que será alterado através da troca do valor pela entrada padrão ‘XX’ (neste ponto, a função ‘*evaluate all controllable configurations*’ utiliza a função do Nível 3 ‘*netlist replace element value*’). No caso ilustrado pela Figura 3.15, verifica-se que para o primeiro elemento controlável, a fonte de tensão ‘*vin*’, o parâmetro escolhido para alteração é a impedância. Já para o segundo elemento controlável, o transformador ‘*tr\_up*’, o parâmetro controlável é o fator de transformação.

A linha seguinte (linha 46) tem a entrada de uma lista de possíveis valores que entrarão na posição indicada pelo ‘XX’, sendo uma lista para cada elemento controlável. Finalmente, as últimas linhas (47 a 52) declaram as entradas e saídas e seus respectivos nós e polaridades, no momento em que a função ‘*evaluate all controllable configurations*’ aciona a outra função do Nível 4 - ‘*evaluate energy efficiency*’.

A função retorna ao usuário um vetor nomeado ‘*best values*’, que informa qual a combinação de possibilidades de elementos controláveis tem melhor valor de eficiência associado. Ela

retorna também a matriz ‘*energy efficiencias*’, que lista as eficiências para cada combinação de elementos controláveis possível. A matriz ‘*energy efficiencias*’ se relaciona com a matriz ‘*I*’, outro retorno da função, para identificação da configuração a que se refere cada posição na matriz ‘*energy efficiencias*’, conforme ilustra a Figura 3.16.

## 3.2 Procedimentos experimentais

Foi testada inicialmente a capacidade do sistema de descrever os circuitos propriamente, conferindo se procedimentos básicos de medição retornam resultados coerentes. Esses testes serão realizados com todos os possíveis dispositivos, individualmente, em diferentes montagens de plantas simples, de forma a validar o Nível 1 e o Nível 2 do sistema.

Após a validação nos níveis básicos do sistema, foram propostas plantas com variações de configuração impostas manualmente, gerando resultados de eficiência diferentes e comparando-os. Esta etapa de teste foi realizada previamente ao desenvolvimento completo das funções que compõem o Nível 3 e o Nível 4 do sistema. Com a ajuda destes testes foi traçada a estratégia para o desenvolvimento das funções dos Níveis 3 e 4, que automatizam esses processos.

A partir da conclusão dos Níveis 3 e 4, foram definidos testes em plantas mais básicas, de resultado conhecido, buscando validar o funcionamento do sistema. Os principais testes preliminares propostos foram:

- Exemplo simples de cálculo de eficiência - planta trifásica simples, com poucos elementos e linhas de impedância baixa, sem transformadores. Verificar o valor da eficiência energética calculada, que deve ser próxima da unidade.
- Exemplo simples de cálculo de eficiência com variação de linha - planta trifásica nos moldes da proposta no item anterior. Mantendo potência de entrada e cargas constantes, ao variar a impedância da linha espera-se melhor eficiência para o caso da linha com menor impedância.
- Exemplo simples com inserção de elementos aleatórios - planta básica, nos moldes da proposta nos itens anteriores, com inserção de uma carga adicional aleatoriamente. Rodando o sistema diversas vezes e guardando a resposta de melhor configuração, verificar a melhora de eficiência que ele é capaz de fornecer.

Estando validado o funcionamento dos quatro níveis que compõem o sistema, foram iniciados os testes avançados. As propostas nessa etapa contam com plantas maiores, de

inviável solução analítica, adicionando a cada novo exemplo uma nova possibilidade de análise fornecida pelo sistema desenvolvido. Os testes propostos foram:

- Exemplo de cálculo de eficiência em planta complexa - montagem de uma planta trifásica robusta, contendo diversas fontes de entrada, linhas, e cargas. Calcular a eficiência energética.
- Exemplo de cálculo de eficiência em planta complexa com adição de transformadores - adicionar na planta anterior um transformador elevador logo após as fontes de tensão de entrada e um abaixador antes das cargas. Calcular a eficiência energética e comparar com o caso anterior, sem a transmissão em alta tensão.
- Exemplo de cálculo de eficiência com variações controladas - montagem de planta trifásica robusta, similar à do item anterior. Propor algumas possibilidades diferentes de impedâncias de linhas de transmissão e calcular a eficiência energética em cada uma delas.
- Exemplo de cálculo de eficiência em planta com alterações não controladas - montagem de uma planta trifásica robusta, similar à dos itens anteriores. Propor possibilidades de alterações aleatórias de entrada de cargas e queda de linhas, rodar várias vezes e observar a eficiência energética em cada caso.
- Exemplo de cálculo de eficiência em planta com alterações não controladas e resposta de nova configuração proposta pelo sistema - adicionar possibilidades de configurações controláveis ao exemplo anterior, rodar várias vezes, e observar as novas eficiências obtidas com a resposta do sistema.

### 3.3 Metodologia de análise

A análise dos resultados obtidos pelo sistema tem como um de seus objetivos demonstrar o quanto o sistema oferece em praticidade na criação e configuração de circuitos elétricos, principalmente trifásicos, através do MatLab<sup>®</sup> no SPICE. Quanto mais complexa é a planta simulada, mais inviável é sua solução analítica - o que torna necessário o uso de simuladores.

No entanto, mesmo utilizando um simulador como o SPICE existem inconvenientes na declaração dos elementos que compõem o circuito, que são triplicados quando se trata de circuitos trifásicos. A análise do *netlist* gerado numa simulação, comparando com os comandos necessários ao MatLab<sup>®</sup> para a geração do mesmo, deixa claro o valor da ferramenta nesse sentido.

Os exemplos propostos também possibilitarão observar via simulação exemplos de alternativas importantes e usuais em sistemas de potência, como a vantagem em termos de eficiência na transmissão de energia elétrica em alta tensão em comparação com transmissão em baixa tensão.

O maior e mais relevante objetivo da análise dos dados é observar a diferença entre a eficiência energética obtida em plantas com possibilidade de resposta do sistema em comparação com plantas sem essa possibilidade. Como previamente explicado, serão impostas possibilidades de alteração de configuração não controláveis, de forma pseudoaleatória, simbolizando quedas de linhas e cargas clandestinas. O sistema fará a leitura do sistema, testará as possibilidades controláveis existentes, e indicará qual delas tem melhor desempenho.

Para tanto, serão gerados pelo sistema resultados em ambos os casos, que serão confrontados através de um gráfico para análise de ganho de eficiência.

```
1 function generate_basic_netlist_file(netlist, file, comment);
2
3 % generate_basic_netlist_file(netlist, file, comment);
4
5 fid = fopen(file, 'r');
6
7 if(fid ~= -1)
8     fclose(fid);
9     error(['File ' file ' already exists.']);
10 end
11
12
13 if(nargin < 3)
14     comment = '* Circuit description\n';
15 else
16     comment = ['* ' comment '\n'];
17 end
18
19 fid = fopen(file, 'w');
20 fprintf(fid, comment);
21 for(k = 1 : length(netlist))
22     fprintf(fid, netlist{k});
23     fprintf(fid, '\n');
24 end
25 fprintf(fid, '.end');
26 fclose(fid);
```

Figura 3.1. Código da função *generate basic netlist file*.

```

1  function netlist = netlist2matlab(netlist_file);
2
3  % netlist = netlist2matlab(netlist_file);
4
5  fid = fopen(netlist_file, 'r');
6  if fid == -1
7      error('File not found');
8  end
9
10 netlist = {};
11 line = fgetl(fid);
12 while(length(line) > 0 & line(1) ~= -1)
13     while(line(1) == ' ')
14         line = line(2 : end);
15     end
16     if(line(1) ~= '.' & line(1) ~= '*')
17         netlist(length(netlist) + 1, 1) = line;
18     end
19     line = fgetl(fid);
20 end
21 fclose(fid);
22

```

Figura 3.2. Código da função *netlist2matlab*.

```

1  function [netlist, added_row_index] = netlistadd(netlist0, rowtoadd);
2
3  % [netlist, added_row_index] = netlistadd(netlist0, rowtoadd);
4
5  netlist = netlist0;
6  added_row_index = length(netlist) + 1;
7  netlist{added_row_index, 1} = rowtoadd;
8

```

Figura 3.3. Código da função *netlist add*.

```

22 - if(imag(impedance) > 0)
23 -     L = imag(impedance) / (2 * pi * frequency);
24 -     netlist{added_row_first_index + 1, 1} = ['l' impedance_name ' ' ...
25 -         intermediate_node ' ' node2 ' ' num2str(L)];
26 - end
27
28 - if(imag(impedance) < 0)
29 -     C = -1 / (2 * pi * frequency * imag(impedance));
30 -     netlist{added_row_first_index + 1, 1} = ['c' impedance_name ' ' ...
31 -         intermediate_node ' ' node2 ' ' num2str(C)];
32 - end

```

Figura 3.4. Trecho do código da função *netlist add impedance*.

```

1 function [netlist, added_row_first_index] = ...
2 netlistaddimpedance_tripphase_delta...
3 (netlist0, impedance_name, node, impedance, frequency);
4
1 function [netlist, added_row_first_index] = ...
2 netlistaddimpedance_tripphase_star...
3 (netlist0, impedance_name, node1, common_node, impedance, ...
4 intermediate_node, frequency);
5

```

Figura 3.5. Comandos de entrada para as funções *netlist add impedance triphase star* e *netlist add impedance triphase delta*.

```

5 - if(nargin < 7)
6 -     frequency = 60;
7 - end
8
9 - if(nargin < 6)
10 -     phase = [0; 2 * pi / 3; 4 * pi / 3];
11 - end
12
13 - phase_degrees = phase * 180 / pi;
14
15 - netlist = netlist0;
16 - for(k = 1 : 3)
17 -     if(strcmp(node1, '0'))
18 -         n1 = '0';
19 -     else
20 -         n1 = [node1 '_phase' num2str(k)];
21 -     end
22 -     if(strcmp(node2, '0'))
23 -         n2 = '0';
24 -     else
25 -         n2 = [node2 '_phase' num2str(k)];
26 -     end
27 -     rowtoadd = [source_name '_phase' num2str(k) ' ' n1 ' ' n2 ' ac ' ...
28 -               num2str(magnitude) ' ' num2str(phase_degrees(k))];
29 -     [netlist, added_row_index(k)] = netlistadd(netlist, rowtoadd);
30 - end

```

Figura 3.6. Trecho do código da função *netlist add source triphase star*.

```

17 - netlist = netlist0;
18 - for(k = 1 : 3)
19 -     n1 = [node1 '_phase' num2str(k)];
20 -     n2 = [node2 '_phase' num2str(k)];
21 -     intermediate1 = [transformer_name '_intermediate_1_phase' num2str(k)];
22 -     intermediate2 = [transformer_name '_intermediate_2_phase' num2str(k)];
23 -     rowtoadd1 = ['r' transformer_name '1_phase' num2str(k) ' ' n1 ' ' ...
24 -         intermediate1 ' ' num2str(resistance1)];
25 -     rowtoadd2 = ['1' transformer_name '1_phase' num2str(k) ' ' ...
26 -         intermediate1 ' 0 ' num2str(inductance1)];
27 -     rowtoadd3 = ['r' transformer_name '2_phase' num2str(k) ' ' n2 ' ' ...
28 -         intermediate2 ' ' num2str(resistance2)];
29 -     rowtoadd4 = ['1' transformer_name '2_phase' num2str(k) ' ' ...
30 -         intermediate2 ' 0 ' num2str(inductance2)];
31 -     rowtoadd5 = ['k' transformer_name '_phase' num2str(k) ' 1' ...
32 -         transformer_name '1_phase' num2str(k) ' 1' transformer_name ...
33 -         '2_phase' num2str(k) ' ' num2str(coupling_factor)];
34 -     [netlist, added_row_index(k)] = netlistadd(netlist, rowtoadd1);
35 -     netlist = netlistadd(netlist, rowtoadd2);
36 -     netlist = netlistadd(netlist, rowtoadd3);
37 -     netlist = netlistadd(netlist, rowtoadd4);
38 -     netlist = netlistadd(netlist, rowtoadd5);
39 - end

```

Figura 3.7. Trecho do código da função *netlist add transformer triphase star*.

```

1   function [netlist, added_row_index] = netlistaddvnull_triphasenetlist0,...
2   element_name, node1, node2);
3
4   netlist = netlist0;
5
6   for(k = 1 : 3)
7       if(strcmp(node1, '0'))
8           n1 = '0';
9       else
10          n1 = [node1 '_phase' num2str(k)];
11         end
12        if(strcmp(node2, '0'))
13            n2 = '0';
14        else
15            n2 = [node2 '_phase' num2str(k)];
16        end
17
18        [netlist, added_row_index(k)] = netlistadd(netlist, [element_name ...
19            '_phase' num2str(k) ' ' n1 ' ' n2 ' dc 0']);
20    end

```

Figura 3.8. Código da função *netlist add vnull triphase*.

```

9 - file = 'temp_file_for_matlab_spice_analysis';
10 - fid = fopen(file, 'r');
11 - while(fid > -1)
12 -     fclose(fid);
13 -     file = [file '_'];
14 -     fid = fopen(file, 'r');
15 - end
16 - fid = fopen(file, 'w');
17
18 - fprintf(fid, '* TEMP\n');
19 - for(k = 1:length(netlist))
20 -     fprintf(fid, netlist{k});
21 -     fprintf(fid, '\n');
22 - end
23 - fprintf(fid, '* Analysis\n');
24 - fprintf(fid, ['.ac dec ' num2str(freqs_per_decade) ' '...
25 -             num2str(initial_freq) ' ' num2str(final_freq) '\n']);
26 - fprintf(fid, ['.print ac ' output '\n']);
27 - fprintf(fid, '.end');
28 - fclose(fid);

```

Figura 3.9. Trecho do código da função *ac analysis*.

```

7 - file = 'temp_file_for_matlab_spice_analysis';
8 - fid = fopen(file, 'r');
9 - while(fid > -1)
10 -     fclose(fid);
11 -     file = [file '_'];
12 -     fid = fopen(file, 'r');
13 - end
14 - fid = fopen(file, 'w');
15
16 - fprintf(fid, '* TEMP\n');
17 - for(k = 1:length(netlist))
18 -     fprintf(fid, netlist{k});
19 -     fprintf(fid, '\n');
20 - end
21 - fprintf(fid, '* Analysis\n');
22 - fprintf(fid, ['.dc ' input ' ' num2str(input_values_and_step(1)) ' '...
23 -             num2str(input_values_and_step(2)) ' '...
24 -             num2str(input_values_and_step(3)) '\n']);
25 - fprintf(fid, ['.print dc ' output '\n']);
26 - fprintf(fid, '.end');
27 - fclose(fid);

```

Figura 3.10. Trecho do código da função *dc analysis*.

```

9 - file = 'temp_file_for_matlab_spice_analysis';
10 - fid = fopen(file, 'r');
11 - while(fid > -1)
12 -     fclose(fid);
13 -     file = [file '_'];
14 -     fid = fopen(file, 'r');
15 - end
16 - fid = fopen(file, 'w');
17 -
18 - fprintf(fid, '* TEMP\n');
19 - for(k = 1:length(netlist))
20 -     fprintf(fid, netlist{k});
21 -     fprintf(fid, '\n');
22 - end
23 - fprintf(fid, '* Analysis\n');
24 - fprintf(fid, ['.tran ' num2str(step) ' ' num2str(final_time) ' ' ...
25 -             num2str(initial_time) '\n']);
26 - fprintf(fid, ['.print tran ' output '\n']);
27 - fprintf(fid, '.end');
28 - fclose(fid);

```

Figura 3.11. Trecho do código da função *trans analysis*.

```

1 function netlist = netlist_replace_element_value...
2 (netlist0, element_name, function_to_add_element, varargin);
3

```

Figura 3.12. Comandos de entrada para a função *netlist replace element value*.

```

10 (netlist, {'zline'}, ...
11 {@netlistaddimpedance_tripphase}, ...
12 {'zline'; 'A'; 'B'; 'XX'}), ...
13 {{1000 + 100 * j; 100 + 100 * j; 100 + 50 * j}}, ...

```

Figura 3.13. Exemplificando os comandos de entrada para a função *netlist replace element value*.

```

1 function [e, input_power, output_power, load_voltages] = ...
2 evaluate_energy_efficiency...
3 (netlist, ...
4 list_of_input_names, ...
5 list_of_input_plus_nodes, list_of_input_minus_nodes, ...
6 list_of_output_names, ...
7 list_of_output_plus_nodes, list_of_output_minus_nodes, ...
8 frequency);

```

---

```

14 [e, input_power, output_power] = ...
15 evaluate_energy_efficiency...
16 (netlist, ...
17 {'vin_phase1'; 'vin_phase2'; 'vin_phase3'}, ...
18 {'A_phase1'; 'A_phase2'; 'A_phase3'}, {'0'; '0'; '0'}, ...
19 {'zload_phase1'; 'zload_phase2'; 'zload_phase3'}, ...
20 {'C_phase1'; 'C_phase2'; 'C_phase3'}, {'D'; 'D'; 'D'}, ...
21 60);

```

Figura 3.14. Exemplificando os comandos de entrada para a função *evaluate energy efficiency*.

```

1  function ...
2  [best_values, energy_efficiencies, I, load_voltages] = ...
3  evaluate_all_controllable_configurations...
4  (netlist0, list_of_controllable_elements, ...
5  functions_to_add_controllable_elements, ...
6  list_parameters_controllable_elements, ...
7  list_of_all_possible_inputs, ...
8  list_of_input_names, list_of_input_plus_nodes, list_of_input_minus_nodes, ...
9  list_of_output_names, list_of_output_plus_nodes, ...
10 list_of_output_minus_nodes, frequency, I0);
11
41 - [best_values, energy_efficiencies, I, load_voltages] = ...
42 evaluate_all_controllable_configurations...
43 (netlist, {'vin';'tr_up'}, ...
44 {@netlistaddsource_triphas_star; @netlistaddtransformer_triphas_delta_delta}, ...
45 {'vin'; 'A'; '0'; 'XX'};{'tr_up', 'B', 'C', Ltr, 'XX'}}, ...
46 {{8000; 7200; 6800};{10.000; 11.1111; 11.7647}}, ...
47 {'vin_phase1'; 'vin_phase2'; 'vin_phase3'}, ...
48 {'A_phase1'; 'A_phase2'; 'A_phase3'}, ...
49 {'0'; '0'; '0'}, ...
50 {'zload_phase1'; 'zload_phase2'; 'zload_phase3'}, ...
51 {'G_phase1'; 'G_phase2'; 'G_phase3'}, ...
52 {'H'; 'H'; 'H'}, ...
53 60);

```

Figura 3.15. Exemplificando os comandos de entrada para a função *evaluate all controllable configurations*.

Command Window		Command Window	
>> I		>> energy_efficiencies	
I =		energy_efficiencies =	
1	1	→	0.942707448758017
1	2	→	0.941468293516079
1	3	→	0.940757108972356
2	1	→	0.942703424575237
2	2	→	0.941466623465866
2	3	→	0.940755473442713
3	1	→	0.942705709634283
3	2	→	0.941467781693598
3	3	→	0.940754763847635
fx >>		fx >>	

Figura 3.16. Relação entre as matrizes ‘*energy efficiencies*’ e ‘*I*’ da função *evaluate all controllable configurations*.

## 4 Resultados

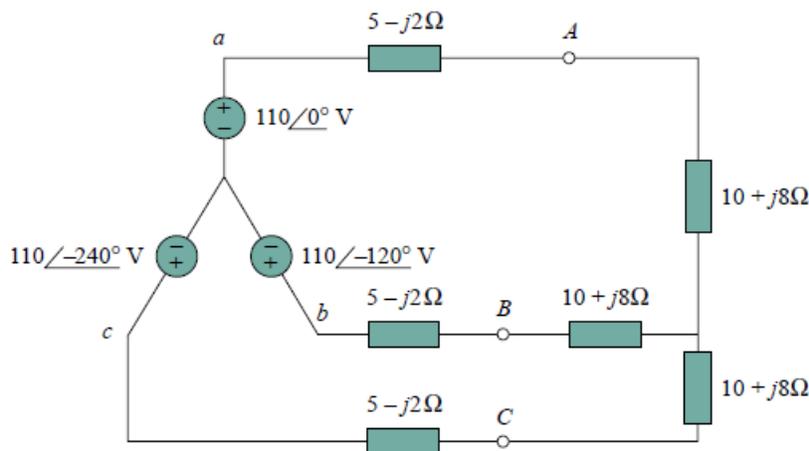
### 4.1 Exemplos para validação da metodologia

#### 4.1.1 Exemplo trifásico simples

Vários pequenos testes em circuitos monofásicos simples foram realizados ao longo do desenvolvimento das funções. Através da resposta do sistema para os circuitos básicos foi sendo confirmado que a interação entre os dois softwares estava ocorrendo de maneira adequada.

Após os testes em pequenos circuitos monofásicos, se partiu para o desenvolvimento e testes de funções para montagem e análise de sistemas trifásicos. Assim como na etapa anterior, também foram feitos testes hipotéticos, apenas para a conferência do tipo de resposta que se espera obter, avaliando defasagem em senoides, por exemplo. Passada esta etapa, foram buscados problemas resolvidos na literatura, para que o teste pudesse validar o funcionamento do sistema comparando os valores de magnitude e fase de correntes num circuito trifásico obtidos pelo sistema com os indicados no solucionário da referência.

O primeiro teste com um circuito trifásico com conferência de valores foi a resolução de uma questão proposta em [1], conforme mostra a Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Circuito da questão reproduzida. Fonte: [1]

Para a resolução do problema o sistema foi totalmente operado pelo MatLab<sup>®</sup>, conforme se deseja que o usuário faça. A descrição do circuito foi feita conforme a Figura 4.2.

Os passos do procedimento foram:

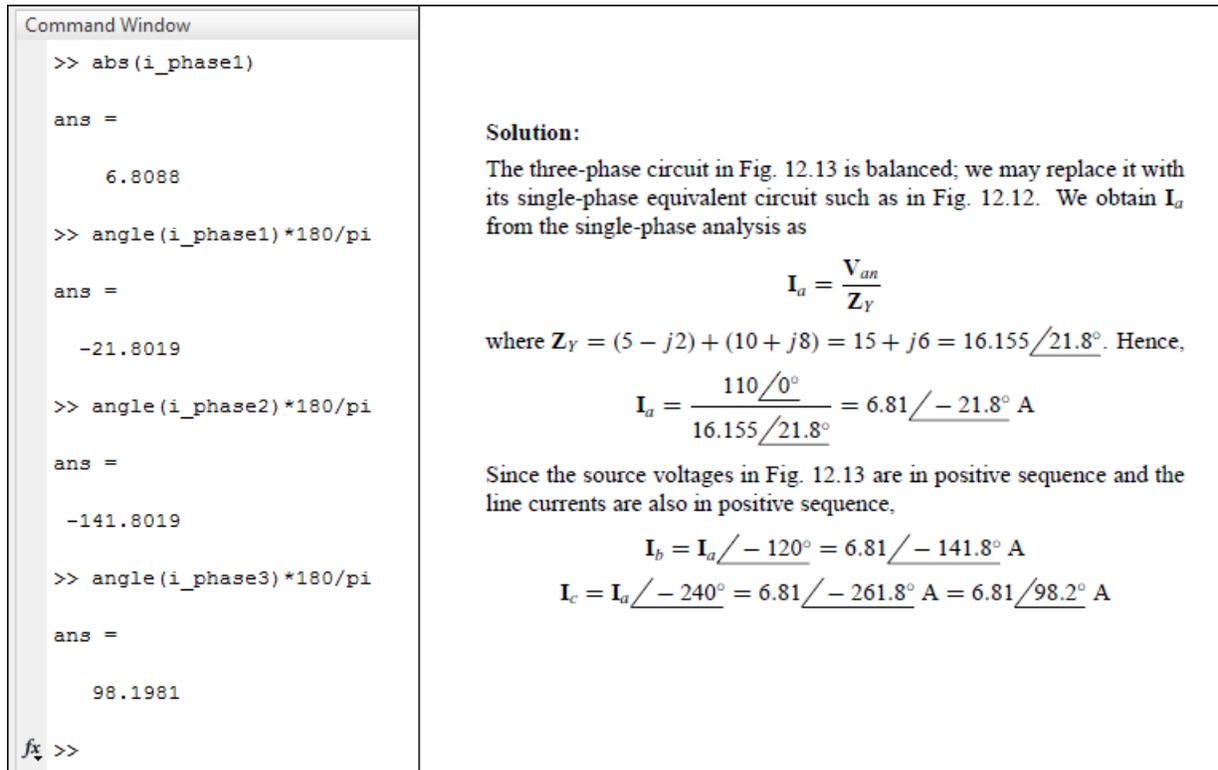
- Inicialmente é atribuído ao *netlist* o valor ‘vazio’ (linha 3).

```
exemplo_sadiku_12.2.m* x
1 - clear all; close all; clc
2
3 - netlist = {};
4 - [netlist, added_row_index_v] = netlistaddsource_tripphase(netlist, 'v', 'A'...
5     , '0', 110);
6 - [netlist, added_row_first_index] = netlistaddimpedance_tripphase(netlist,...
7     'z1', 'A', 'B', 5-2*j);
8 - [netlist, added_row_index] = netlistaddvnull_tripphase(netlist, 'vnull',...
9     'B', 'extra');
10 - [netlist, added_row_first_index] = netlistaddimpedance_tripphase(netlist,...
11     'zc', 'extra', '0', 10+8*j);
12
13 - i_phase1 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnull_phase1)');
14 - i_phase2 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnull_phase1)');
15 - i_phase3 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnull_phase1)');
16
```

Figura 4.2. Código utilizando as funções do sistema para resolução do exercício da referência

- Então, é iniciada a descrição do circuito, utilizando a função *netlist add source triphase* (linhas 4 e 5) para incluir a fonte trifásica no sistema. Nomeou-se a fonte como V, entre os nós A e 0 (terra), com tensão RMS de 110 volts. O sistema se encarrega de criar os nós por fase, e automaticamente os nomeia como A1, A2 e A3. Além disso são atribuídos automaticamente os valores de fase e frequência padrão.
- É adicionada uma impedância, conectada à fonte (linhas 6 e 7), representando as perdas da linha. É dado o nome Z1. Ela é conectada entre os nós A e B e tem valor de  $5 - j2$ .
- O cálculo das correntes de linha é realizado pelo *'vnull'* (linhas 8 e 9), como descrito no capítulo que aborda a metodologia. Conecta-se o 'ampérimetro' entre o nó B e um nó 'extra', localizado entre a impedância da linha e a carga.
- Finalmente é adicionada a carga (linhas 10 e 11), analogamente ao feito para a impedância da linha, nomeada como ZC. Ela fica entre os nós 'extra' e 0 (terra), com valor  $10 + j8$ .
- Finalmente, é feita a especificação da análise dos resultados (linhas 13 a 15). A saída solicitada é a corrente de linha nas três fases do circuito, explicitando uma análise AC com medição de corrente no 'vnull' de cada fase. São inseridos os limites inferior e superior de frequência a analisar, mas como só interessa a frequência de 60 hertz, foram solicitados apenas 10 pontos por década (nas linhas 13 a 15 a sequência '10, 60, 60' corresponde ao número de pontos por década, frequência inicial e frequência final, respectivamente).

Os resultados obtidos pelo sistema, aplicando o código mostrado na Figura 4.2, foram exatamente os contidos na resolução do livro, em magnitude e fase, conforme é mostrado na Figura 4.3, que é uma captura de tela da janela de comandos do MatLab<sup>®</sup> juntamente à uma captura de tela da resolução do livro para o mesmo problema.



**Figura 4.3.** Resultado calculado pelo sistema exibido no painel do MatLab<sup>®</sup>, ao lado da resolução do exercício da referência [1].

Como o circuito é balanceado, a magnitude é igual para as três fases, portanto só é calculada uma vez. Após isso, são calculadas as fases das três correntes. Observa-se que os resultados são exatamente os mesmo obtidos na literatura, quando se faz o arredondamento do valor encontrado para apenas duas casas decimais.

A diferença entre o código necessário para a descrição completa do problema utilizando apenas o SPICE e o código que foi utilizado na solução usando o sistema desenvolvido é mostrada na Figura 4.4. Enquanto com o SPICE seriam necessárias 21 linhas de código, com o sistema desenvolvido é possível realizar a mesma tarefa com apenas 9 linhas.

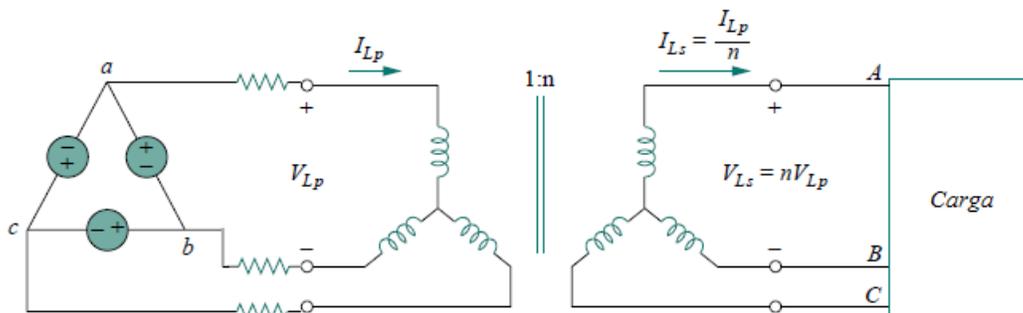
### 4.1.2 Exemplo com transformador trifásico

O exemplo a seguir é a ligação de uma fonte trifásica estrela (Y) com um transformador trifásico estrela-estrela (Y-Y) alimentando uma carga trifásica conectada também em estrela

<pre> 1 v_phase1 A_phase1 0 ac 110 0 2 v_phase2 A_phase2 0 ac 110 -120 3 v_phase3 A_phase3 0 ac 110 -240 4 5 rz1_phase1 A_phase1 betweenAandB_phase1 5 6 cz1_phase1 betweenAandB_phase1 B_phase1 0.0013263 7 rz1_phase2 A_phase2 betweenAandB_phase2 5 8 cz1_phase2 betweenAandB_phase2 B_phase2 0.0013263 9 rz1_phase3 A_phase3 betweenAandB_phase3 5 10 cz1_phase3 betweenAandB_phase3 B_phase3 0.0013263 11 12 vnull_phase1 B_phase1 extra_phase1 dc 0 13 vnull_phase2 B_phase2 extra_phase2 dc 0 14 vnull_phase3 B_phase3 extra_phase3 dc 0 15 16 rzc_phase1 extra_phase1 betweenextraand0_phase1 10 17 lzc_phase1 betweenextraand0_phase1 0 0.021221 18 rzc_phase2 extra_phase2 betweenextraand0_phase2 10 19 lzc_phase2 betweenextraand0_phase2 0 0.021221 20 rzc_phase3 extra_phase3 betweenextraand0_phase3 10 21 lzc_phase3 betweenextraand0_phase3 0 0.021221 </pre>	<pre> 1 - netlist = {}; 2 - [netlist, added_row_index_v] = netlistaddsource_tri 3 - [netlist, added_row_first_index] = netlistaddimpeda 4 - [netlist, added_row_index] = netlistaddvnull_tripha 5 - [netlist, added_row_first_index] = netlistaddimpeda 6 7 - i_phase1 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnul 8 - i_phase2 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnul 9 - i_phase3 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnul </pre>
--	--

**Figura 4.4.** Códigos necessários para a solução do problema utilizando o SPICE (1) e utilizando o sistema desenvolvido (2). Foi cortada uma parte do código à direita, mas o texto completo consta na Figura 4.2

(Y). Os valores são hipotéticos, portanto o teste não fornece validação em termos de conferência de resultado, mas apenas em relação ao tipo de resposta esperada. A representação gráfica do circuito proposto é conforme a Figura 4.5.



**Figura 4.5.** Representação em diagrama do circuito hipotético proposto para o teste. Fonte: [1]

O trecho do código utilizado na descrição do circuito que especifica o tipo de análise e as saídas está na Figura 4.6. São utilizados elementos semelhantes ao do exemplo anterior, com exceção ao transformador trifásico, adicionado ao circuito com a função *netlist add transformer triphase star*.

O transformador é estrela-estrela (Y-Y), e é identificado com o nome T, fica entre os nós B e C, tem indutância no primário de 1 henry e fator de transformação de um para 2.

Os comandos que definem como as saídas de resultado serão exibidas estão na Figura 4.7.

```

1 - clear all; close all; clc
2
3 - netlist = {};
4 - [netlist, added_row_index_v] = netlistaddsource_triphasenetlist, 'v', 'A',...
5   '0', 10);
6 - [netlist, added_row_index_z] = netlistaddimpedance_triphasenetlist, 'z',...
7   'A', 'B', 2+]);
8 - [netlist, added_row_index_T] = netlistaddtransformer_triphasenetlist, ...
9   'T', 'B', 'C', 1, 2);
10 - [netlist, added_row_index_zc] = netlistaddimpedance_triphasenetlist, 'zc',...
11   'C', 'D', 4-(2*]);
12 - [netlist, added_row_index_vnull] = netlistaddvnull_triphasenetlist, 'vnull',...
13   'D', '0');
14
15 - vc_phase1 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'v(c_phase1)');
16 - vc_phase2 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'v(c_phase2)');
17 - vc_phase3 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'v(c_phase3)');
18 - va_phase1 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'v(a_phase1)');
19 - izc_phase1 = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'i(vnull_phase1)');
20

```

**Figura 4.6.** Trecho do código utilizado para o exemplo, descrevendo o circuito e definindo o tipo de simulação.

Para tanto foram utilizadas as funções *fasor2signal*, que proporciona a possibilidade de visualizar a senoide do sinal obtido na saída, e a função *fasor diagram*, que gera um diagrama fasorial do sinal obtido na saída. São duas pequenas e simples funções desenvolvidas pelos autores do trabalho, e serão devidamente expostas na versão final do trabalho.

Em seguida são exibidos os resultados da simulação na configuração inicial. Um diagrama fasorial mostrando a defasagem entre as tensões na carga e um gráfico com as três senoides de saída (tensões na carga) é exibido em Figura 4.8. Já na Figura 4.9 é mostrado outro diagrama fasorial, desta vez mostrando a diferença entre as fases das tensões de entrada e saída.

Ao desbalancear a carga e a fonte, são esperadas variações nos resultados, que podem ser representadas de maneira bastante didática pelos mesmos métodos utilizados em Figura 4.8 e Figura 4.9.

As alterações no circuito são feitas manualmente, enquanto ainda não estão concluídas as funções dos níveis 3 e 4 do sistema, que tornarão esta tarefa mais prática, além de oferecer possibilidades de alterações atreladas a eventos probabilísticos controlados pelo usuário, aproximando a simulação de eventos reais. A mudança no código que altera a impedância em uma das fases da carga é mostrada na Figura 4.10.

É possível observar os efeitos nos resultados das tensões, como ilustra a Figura 4.11, em comparação com a Figura 4.9. Fica evidente o atraso na fase e o aumento na magnitude da tensão na carga da fase 3, a que sofreu alteração em relação ao valor definido na primeira

```

20
21 - [vc1, tc1] = fasor2signal(vc_phase1, 6, 60, 1000000);
22 - [vc2, tc2] = fasor2signal(vc_phase2, 6, 60, 1000000);
23 - [vc3, tc3] = fasor2signal(vc_phase3, 6, 60, 1000000);
24 - [va1, ta1] = fasor2signal(va_phase1, 6, 60, 1000000);
25
26 - fasor_diagram([vc_phase1; vc_phase2; vc_phase3], {'b'; 'r'; 'k'});
27 - figure;
28 - plot(tc1, vc1, 'b');
29 - hold on;
30 - plot(tc2, vc2, 'r');
31 - plot(tc3, vc3, 'k');
32 - xlabel('Tempo (segundos)');
33 - ylabel('Tensão (volts)');
34 - grid on;
35 - legend('saída - fase 1', 'saída - fase 2', 'saída - fase 3')
36
37 - fasor_diagram([va_phase1; vc_phase1], {'b'; 'r'});
38 - figure;
39 - plot(ta1, va1, 'b');
40 - hold on;
41 - plot(tc1, vc1, 'r');
42 - xlabel('Tempo (segundos)');
43 - ylabel('Tensão (volts)');
44 - grid on;
45 - legend('entrada - fase 1', 'saída - fase 1')
46

```

**Figura 4.7.** Trecho do código utilizado para o exemplo, descrevendo as saídas desejadas: diagramas fasoriais e gráficos senoidais.

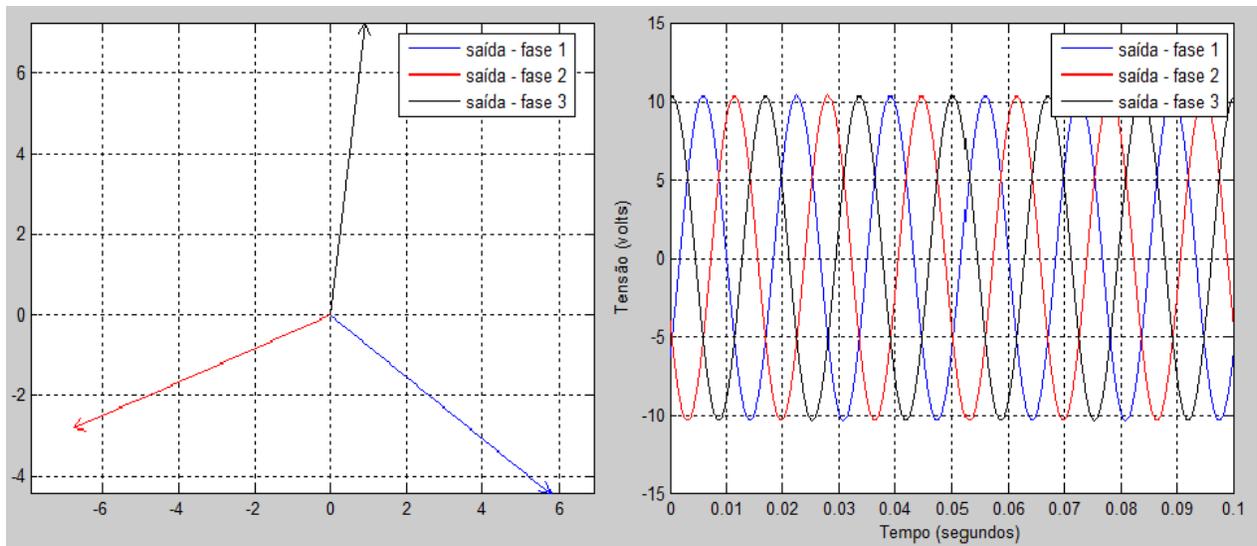
etapa do exemplo, quando a carga ainda era balanceada.

Assim como foi mostrado no exemplo trifásico simples, a diferença entre o código necessário para descrever um circuito no SPICE e o código necessário no sistema desenvolvido é bastante relevante. A Figura 4.12 mostra a diferença entre os códigos, onde se tem uma economia de 27 linhas de código (33 no SPICE contra 6 no sistema desenvolvido).

### 4.1.3 Teste dos Níveis 3 e 4

A verificação do funcionamento ideal das funções dos Níveis 3 e 4 é bastante simples, e é realizada num só teste. Isso ocorre porque as funções do Nível 3 (*netlist replace element value*, *netlist remove element* e as funções de adição de impedâncias) são chamadas internamente pela função do Nível 4 *evaluate all controllable configurations*, que por sua vez chama internamente a outra função que compõe o Nível 4, *evaluate energy efficiency*.

A partir de um *netlist* previamente definido, é chamada a função *evaluate all controllable configurations* e proposta a variação de parâmetros de elementos da planta original. O caso ilustrativo é de um circuito trifásico simples, a fim de facilitar a observação das alterações no *netlist*.



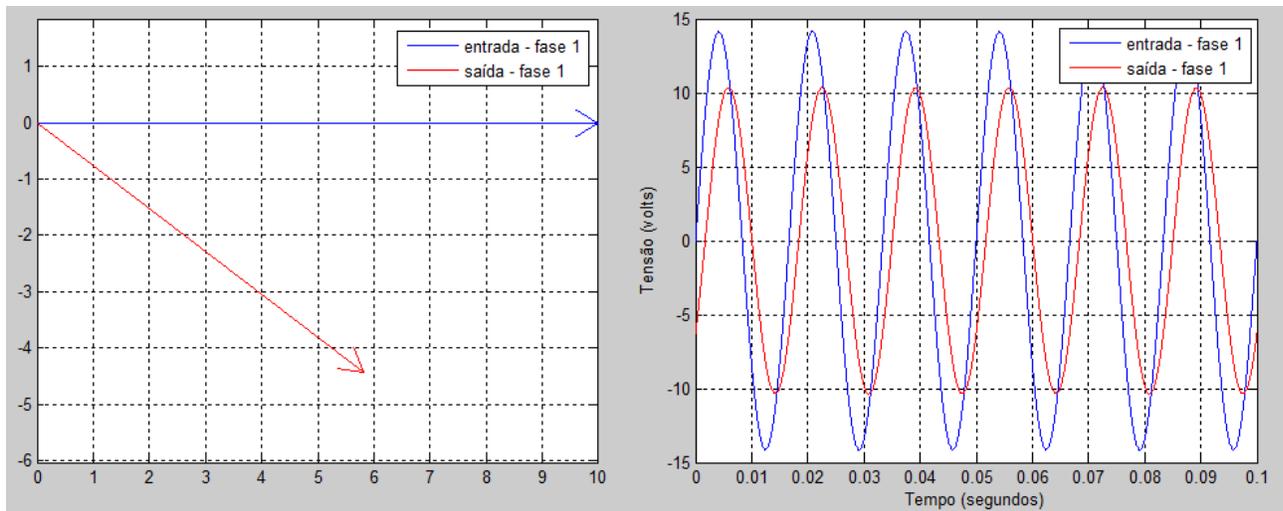
**Figura 4.8.** Saídas de resultados solicitadas no exemplo do transformador trifásico: diagrama fasorial das tensões de saída e superposição das senoides num gráfico.

A Figura 4.13 mostra a descrição do circuito original nas linhas entre 3 e 6. Na linha 8 é chamado um *ac analysis* para guardar o valor da tensão na carga, no circuito original, dentro da variável ‘*V\_LOAD*’. Nas linhas 10 a 22 é chamada a função *evaluate all controllable configurations*, utilizando os comandos conforme explicado na Seção 3.1.4. A alteração definida foi na tensão da fonte de entrada ‘*vin*’ (linhas 12 a 14), e na linha 15 é definido o novo valor a ser atribuído: anteriormente definido em 250 volts, ele passará a ser de 500 volts.

A função *evaluate all controllable configurations* guarda numa matriz chamada ‘*load voltages*’ as tensões em todas as fases da carga da planta simulada. A validação da alteração é realizada comparando o valor da tensão na carga antes da alteração, através da variável ‘*V\_LOAD*’, e a tensão na carga depois da alteração, através da matriz ‘*load voltages*’. A impedância da linha é bem inferior à da carga, de modo que as tensões medidas devem ser bem próximas à tensão fornecida pela fonte: 250 volts no *netlist* original e 500 volts no *netlist* alterado.

É possível observar na Figura 4.14 que o teste procedeu como esperado. A variável ‘*V\_LOAD*’ retornou um valor bastante próximo dos 250 volts fornecidos, e no *netlist* alterado a matriz ‘*load voltages*’ mostra que em todas as 3 fases da carga a tensão tem módulo muito próximo de 500 volts.

Ainda na Figura 4.14 é possível observar o cálculo da eficiência energética, que retornou o valor de mais de 99%, esperado devido a baixa impedância da linha em relação à carga.



**Figura 4.9.** Saídas de resultados solicitadas no exemplo do transformador trifásico: diagrama fasorial das tensões de entrada e saída e superposição das senoides das mesmas tensões num gráfico.

```

3 - netlist = {};
4 - [netlist, added_row_index_v] = netlistaddsource_triphase(netlist, 'v', 'A',...
5 -   '0', 10);
6 - [netlist, added_row_index_z] = netlistaddimpedance_triphase(netlist, 'z',...
7 -   'A', 'B', 2+j);
8 - [netlist, added_row_index_T] = netlistaddtransformer_triphase_star(netlist,...
9 -   'T', 'B', 'C', 1, 2);
10 - [netlist, added_row_index_zc] = netlistaddimpedance_triphase(netlist, 'zc',...
11 -   'C', 'D', [4-(2*j);4-(2*j);12-(8*j)]);
12 - [netlist, added_row_index_vnull] = netlistaddvnull_triphase(netlist, 'vnull',...
13 -   'D', '0');

```

**Figura 4.10.** Trecho do código utilizado para o exemplo. Na linha 11, o vetor das impedâncias que compõem a carga tem a alteração na terceira fase.

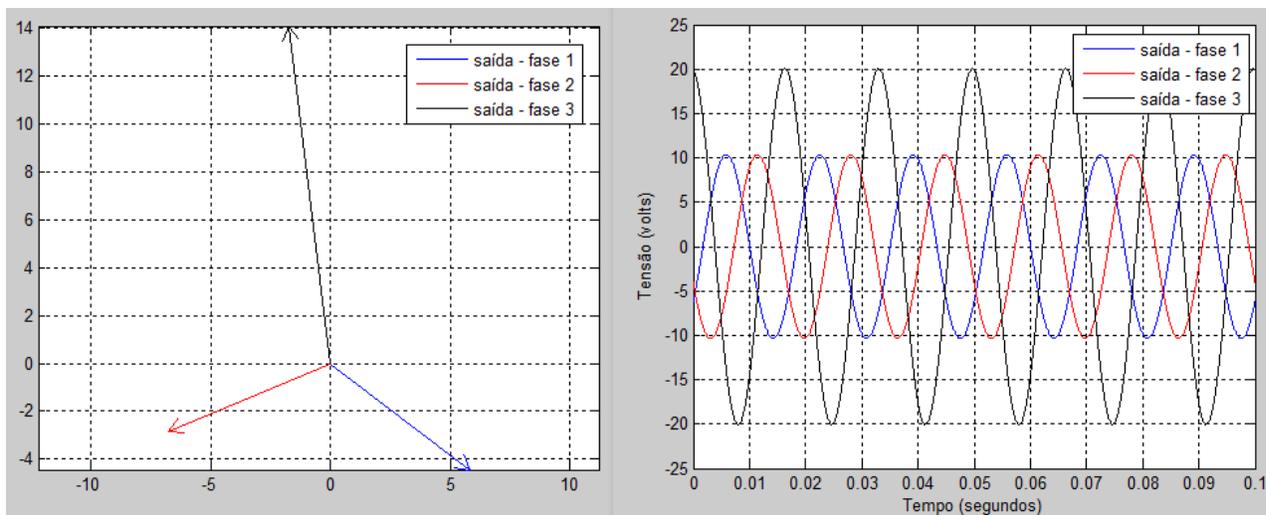
## 4.2 Testes propostos

### 4.2.1 Teste 1: Cálculo de eficiência energética numa planta robusta

O teste de cálculo de eficiência pretende ilustrar o funcionamento do sistema numa planta mais complexa do que as mostradas anteriormente, na seção 2.3.3 abordando entrega de potência e na seção 4.1.3 procedendo a validação dos Níveis 3 e 4. A seguir, na Tabela 4.1, são apresentados os elementos que compõem o circuito proposto para o presente teste.

A eficiência é calculada utilizando a função *evaluate energy efficiency*. As saídas são a potência de entrada, a potência de saída e a eficiência, conforme ilustrado pelas capturas de tela da janela de comando do MatLab® a seguir.

Conforme observado na Figura 4.15, como a planta conta com 5 fontes de tensão na



**Figura 4.11.** Saídas de resultados solicitadas no exemplo do transformador trifásico com carga desbalanceada: diagrama fasorial das tensões de saída e superposição das senoides das mesmas tensões num gráfico.

entrada do sistema, cada uma com três fases, tem-se no total 15 fases de entrada no sistema, motivo pelo qual são calculadas 15 potências de entrada. Na Figura 4.16 o mesmo acontece com as potências de saída - são 7 cargas trifásicas, que totalizam 21 fases. Finalmente, a Figura 4.17 mostra a eficiência calculada para o sistema, com resultado de aproximadamente 48%. O Teste 4 da presente seção utilizará a mesma planta com variações na tensão de entrada, ilustrando variações na eficiência.

#### 4.2.2 Teste 2: Análise de eficiência da transmissão com diferentes tamanhos de linha

A planta proposta para o Teste 2 é composta por 3 fontes de tensão na entrada, conectadas a transformadores elevadores por linhas de transmissão. Os transformadores por sua vez são conectados a uma carga única. Os elementos que compõem a planta constam na Tabela 4.2.

Conforme observado na Tabela 4.2, as variações possíveis são em uma das linhas, a 'zline1'. A variação da impedância da linha pretende ilustrar o aumento do comprimento de uma linha de transmissão que, conforme mostrado na com a expressão 2.27, interfere diretamente na resistência de um condutor. Portanto, aumentando o comprimento de uma linha de transmissão, aumenta-se a resistência associada à mesma. Desta forma, é esperado que se tenha maior nível de perda de potência ao longo da linha, de modo a prejudicar a eficiência energética.

Na Figura 4.18 observam-se os comandos do cálculo de eficiência com variação na linha

<pre> 1 v_phase1 A_phase1 0 ac 10 0 2 v_phase2 A_phase2 0 ac 10 -120 3 v_phase3 A_phase3 0 ac 10 -240 4 rz_phase1 A_phase1 betweenAandB_phase1 2 5 lz_phase1 betweenAandB_phase1 B_phase1 0.0026526 6 rz_phase2 A_phase2 betweenAandB_phase2 2 7 lz_phase2 betweenAandB_phase2 B_phase2 0.0026526 8 rz_phase3 A_phase3 betweenAandB_phase3 2 9 lz_phase3 betweenAandB_phase3 B_phase3 0.0026526 10 rT1_phase1 B_phase1 T_intermediate_1_phase1 0 11 lT1_phase1 T_intermediate_1_phase1 0 1 12 rT2_phase1 C_phase1 T_intermediate_2_phase1 0 13 lT2_phase1 T_intermediate_2_phase1 0 4 14 kT_phase1 lT1_phase1 lT2_phase1 0.9999 15 rT1_phase2 B_phase2 T_intermediate_1_phase2 0 16 lT1_phase2 T_intermediate_1_phase2 0 1 17 rT2_phase2 C_phase2 T_intermediate_2_phase2 0 18 lT2_phase2 T_intermediate_2_phase2 0 4 19 kT_phase2 lT1_phase2 lT2_phase2 0.9999 20 rT1_phase3 B_phase3 T_intermediate_1_phase3 0 21 lT1_phase3 T_intermediate_1_phase3 0 1 22 rT2_phase3 C_phase3 T_intermediate_2_phase3 0 23 lT2_phase3 T_intermediate_2_phase3 0 4 24 kT_phase3 lT1_phase3 lT2_phase3 0.9999 25 rzc_phase1 C_phase1 betweenCandD_phase1 4 26 czc_phase1 betweenCandD_phase1 D_phase1 0.0013263 27 rzc_phase2 C_phase2 betweenCandD_phase2 4 28 czc_phase2 betweenCandD_phase2 D_phase2 0.0013263 29 rzc_phase3 C_phase3 betweenCandD_phase3 4 30 czc_phase3 betweenCandD_phase3 D_phase3 0.0013263 31 vnull_phase1 D_phase1 0 dc 0 32 vnull_phase2 D_phase2 0 dc 0 33 vnull_phase3 D_phase3 0 dc 0 </pre>	<pre> 1 - netlist = {}; 2 - [netlist, added_row_index_v] = netlistaddsource_ 3 - [netlist, added_row_index_z] = netlistaddimpedan 4 - [netlist, added_row_index_T] = netlistaddtransfo 5 - [netlist, added_row_index_zc] = netlistaddimpeda 6 - [netlist, added_row_index_vnull] = netlistaddvnu </pre>
--	---

**Figura 4.12.** Códigos necessários para a solução do problema utilizando o SPICE (1) e utilizando o sistema desenvolvido (2). Foi cortada uma parte do código à direita, mas o texto completo consta na Figura 4.6

‘*zline1*’. Na linha 32 são descritas as quatro possibilidades, conforme indicado na Tabela 4.2. A Figura 4.19 mostra na saída ‘*best values*’ a melhor configuração entre as possíveis: como esperado, a de menor impedância foi a escolhida. Na saída ‘*energy efficiencies*’ são listadas as eficiências para cada uma das possíveis impedâncias da linha ‘*zline1*’, na mesma ordem em que foram listadas na linha 32 da Figura 4.18. A Tabela 4.3 mostra a eficiência calculada para cada diferente configuração simulada.

### 4.2.3 Teste 3: Análise do impacto da transmissão em alta tensão

O Teste 3 pretende ilustrar o ganho em termos de eficiência quando se transmite a energia elétrica em alta tensão. A teoria imediata por trás dessa vantagem reside no fato de que, para uma dada potência, aumentando a tensão é possível transportar a mesma quantidade de potência com menor corrente, numa implicação clara da expressão 2.16 na seção 2.2.5 do presente trabalho. E com uma corrente menor, a perda ôhmica é menor (conforme ilustra a expressão 2.2.8 da seção 2.3.1).

A ilustração do problema se dará através de uma simulação de um sistema trifásico com

```

1 - clear all; close all; clc
2
3 - netlist = {};
4 - netlist = netlistaddsource_triphas_star(netlist, 'vin', 'A', '0', 250);
5 - netlist = netlistaddimpedance_triphas(netlist, 'zline', 'A', 'B', 2e-3 + 1e-3 * j);
6 - netlist = netlistaddimpedance_triphas_star(netlist, 'zload', 'B', '0', 10 + 5 * j);
7
8 - V_LOAD = ac_analysis(netlist, 10, 60, 60, 'v(B_phase1)');
9
10 - [best_values, energy_efficiencies, I, load_voltages] = ...
11 evaluate_all_controllable_configurations...
12 (netlist, {'vin'}, ...
13 {@netlistaddsource_triphas_star}, ...
14 {'vin'; 'A'; '0'; 'XX'}, ...
15 {500}, ...
16 {'vin_phase1'; 'vin_phase2'; 'vin_phase3'}, ...
17 {'A_phase1'; 'A_phase2'; 'A_phase3'}, ...
18 {'0'; '0'; '0'}, ...
19 {'zload_phase1'; 'zload_phase2'; 'zload_phase3'}, ...
20 {'B_phase1'; 'B_phase2'; 'B_phase3'}, ...
21 {'0'; '0'; '0'}, ...
22 60);

```

**Figura 4.13.** Entradas utilizadas para rodar o exemplo proposto para validação dos Níveis 3 e 4.

fonte, transformadores (elevador e abaixador) e carga, unidos por linhas representadas por impedâncias. A Tabela 4.4 lista os elementos que compõem a planta em questão.

As entradas controláveis escolhidas foram os transformadores, tanto o elevador quanto o abaixador. Para efeitos de comparação, a primeira combinação de configuração possível coloca fator 1 para ambos, de modo a simular o que ocorreria com o circuito sem aumento de tensão para a transmissão. As outras configurações são com aumento de 2 e 10 vezes na tensão de transmissão, com compensação equivalente no transformador abaixador para que chegue o mesmo patamar de tensão na carga.

Na Figura 4.20 observa-se que as tensões na saída estão devidamente ajustadas, de forma que houve variação mínima (valores entre 401 e 404 volts) na tensão que alimenta a carga do sistema. Na Figura 4.21 fica demonstrado o ganho em eficiência quando se utiliza o artifício de transmissão em alta tensão. No teste proposto, a configuração com transformador elevador com maior fator de transformação (fator 10) apresentou o melhor desempenho, conforme mostrado pela saída ‘best values’. As demais eficiências são mostradas também na Figura 4.21. Há um aumento de eficiência quando se dobra a tensão de transmissão, e quando ela é aumentada 10 vezes a eficiência é ainda melhor. A Tabela 4.5 mostra as eficiências calculadas para cada diferente combinação de configuração simulada.

```
Command Window
>> abs(V_LOAD)
ans =
    249.9500
>> abs(load_voltages)
ans =
    499.9000    499.8999    499.9000
    249.9500    249.9500    249.9500
>> energy_efficiencies
energy_efficiencies =
    0.9998
    0.9998
fx >>
```

**Figura 4.14.** Resultado do teste de validação dos Níveis 3 e 4 na tela de comando do MatLab®.

#### 4.2.4 Teste 4: Análise de tensão de entrada

O Teste 4 ilustra um caso onde a tensão de entrada é majorada, de forma que diminuindo a entrada obtêm-se melhor eficiência, alimentando a mesma carga e com mesmo nível de tensão. O exemplo do Teste 4 traz uma planta grande, com diversas fontes, linhas, transformadores e cargas, um tipo de problema de solução absolutamente inviável sem auxílio computacional.

O *netlist* necessário para a descrição do circuito proposto é composto por 312 linhas, enquanto apenas 38 linhas de comando são suficientes para descrevê-lo a partir do sistema desenvolvido, com entradas via MatLab®. Abaixo, são mostrados os elementos que compõem a planta simulada. A Tabela 4.1 mostra a extensa lista dos elementos inseridos no *netlist* e os parâmetros de cada um deles.

A Figura 4.22 mostra que as tensões na carga sofrem variações pequenas, da ordem de 10%. Pequenos ajustes nos fatores de transformação dos transformadores elevadores seriam suficientes para ajustar essa tensão sem impacto significativo na eficiência do sistema. Já na Figura 4.23 é mostrado o melhor valor entre os propostos, 8 kV, e abaixo são mostradas as eficiências para as três possibilidades simuladas. A Tabela 4.6 mostra as eficiências para cada configuração: a tensão original de 13 kV e as variações propostas de 8 kV e 5 kV. A melhor eficiência calculada é de aproximados 52%, com variações para 48% e 50% nas outras configurações.

```

Command Window
>> abs(input_power)

ans =

    1.0e+07 *

Columns 1 through 10

    1.0166    1.0166    1.0166    0.5822    0.5822    0.5822    0.5264    0.5264    0.5264    0.5823

Columns 11 through 15

    0.5823    0.5823    0.1676    0.1676    0.1676

```

Figura 4.15. Potências de entrada do Teste 1 na tela de comando do MatLab®.]

```

Command Window
>> abs(output_power)

ans =

    1.0e+06 *

Columns 1 through 10

    1.7146    1.7146    1.7146    2.2846    2.2846    2.2846    1.7146    1.7146    1.7146    1.5280

Columns 11 through 20

    1.5279    1.5279    2.2896    2.2896    2.2896    1.7192    1.7192    1.7192    1.5249    1.5249

Column 21

    1.5249

```

Figura 4.16. Potências de saída do Teste 1 na tela de comando do MatLab®.

#### 4.2.5 Teste 5: Resposta de melhor configuração com duas opções de elementos configuráveis

Para o presente teste, foi definida uma planta trifásica com transformadores elevadores e abaixadores, passando por linhas com impedâncias diferentes e alimentando uma carga trifásica no final. É um circuito de complicada solução analítica manual, o que fica ainda mais inviável considerando as diferentes combinações propostas a partir da variação de dois diferentes elementos dentro da planta.

A Tabela 4.7 mostra os elementos que compõem a planta descrita. Como pode ser observado, foram propostas variações na fonte de tensão de entrada ('vin') e no fator de transformação do transformador elevador ('tr\_up'), de forma a manter a tensão que chega na carga sem grandes variações.

Command Window	Command Window
<pre>&gt;&gt; A=sum(real(input_power)) A =     7.8641e+07 &gt;&gt; B=sum(real(output_power)) B =     3.8254e+07 &gt;&gt; efficiency = B/A efficiency =     0.4864 fx &gt;&gt;  </pre>	<pre>&gt;&gt; e e =     0.4864 fx &gt;&gt;  </pre>

Figura 4.17. Eficiência do Teste 1 na tela de comando do MatLab®.

```

25 %-----Calculating energy efficiency-----
26
27 - [best_values, energy_efficiencies, I, load_voltages] = ...
28 evaluate_all_controllable_configurations...
29 (netlist, {'zline1'}, ...
30 {@netlistaddimpedance_tripphase}, ...
31 {'zline1'; 'A1'; 'B1'; 'XX'}, ...
32 {(2e+3 + 1e+3 *1i; 4e+3 + 1e+3 *1i; 6e+3 + 1e+3 *1i; 8e+3 + 1e+3 *1i)}, ...

```

Figura 4.18. Comandos para o Teste 2: cálculo de eficiência com variação na linha ‘zline1’.

A descrição dessa planta no SPICE num *netlist* tradicional necessitaria de 72 linhas de comando, além de atenção necessária para valores de defasagem entre as fontes de tensão, por exemplo. Utilizando o sistema desenvolvido, dando as entradas através do MatLab®, apenas 8 linhas de comando fazem o mesmo trabalho, além de automatizar a defasagem das fontes de tensão.

A função utilizada é a *evaluate all controllable configurations*, e na Figura 4.24 é possível observar:

- Na saída ‘*load voltages*’, que as tensões na carga sofrem variações mínimas;
- Na saída ‘*best values*’ é indicada a melhor configuração entre as testadas - 8 kV com fator de 10; e
- Na saída ‘*energy efficiencies*’ são listadas as eficiências para cada combinação, onde observa-se que a combinação ‘1-1’ de fato é a que apresenta melhor eficiência, conforme indicado pela saída ‘*best values*’.

```
Command Window
>> best_values

best_values =

    [2.0000e+03 + 1.0000e+03i]

>> energy_efficiencies

energy_efficiencies =

    0.9181
    0.9026
    0.8960
    0.8925

fx >> |
```

Figura 4.19. Resultados do Teste 2: melhor configuração e eficiências..

```
Command Window
>> abs(load_voltages)

ans =

    401.0998    401.1002    401.1000
    403.2717    403.2717    403.2718
    404.4554    404.4550    404.4555
```

Figura 4.20. Tensões na carga do Teste 3 na tela de comando do MatLab®.

A Tabela 4.8 mostra os resultados das eficiências calculadas para cada diferente configuração testada, com as combinações propostas de tensão de entrada e fator de transformação mostradas na Tabela 4.7.

#### 4.2.6 Teste 6: Inserção de elemento aleatório com resposta de melhor configuração

O Teste 6 utiliza as ferramentas do sistema em sua totalidade, ilustrando tanto a capacidade do sistema em facilitar cálculos trabalhosos quanto a possibilidade de responder às alterações não controláveis ao longo do tempo, indicando qual das possibilidades de configuração controláveis é a mais adequada para que a eficiência seja a maior possível.

A Tabela 4.9 mostra os elementos que compõem a planta simulada e indica os elementos controláveis: a fonte de tensão ‘vin2’, a linha ‘zline1’ e o transformador elevador ‘tr\_up3’.

O Teste 6 simula a entrada de componentes aleatórios no circuito, de forma a creditar um aspecto aproximado do real, onde alterações constantes conferem ao sistema característica bastante dinâmica. Foi inserida uma carga simulando uma ligação elétrica clandestina, à

```

Command Window

>> best_values

best_values =

    [10]    [0.0950]

>> energy_efficiencies

energy_efficiencies =

    0.7894
    0.8281
    0.8393

fx >>

```

Figura 4.21. Resultados do Teste 3 na tela de comando do MatLab®.

```

Command Window

>> abs(load_voltages)

ans =

    1.0e+05 *

Columns 1 through 10

    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728
    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881
    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373

Columns 11 through 20

    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728    1.1728
    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881    1.0881
    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373    1.0373

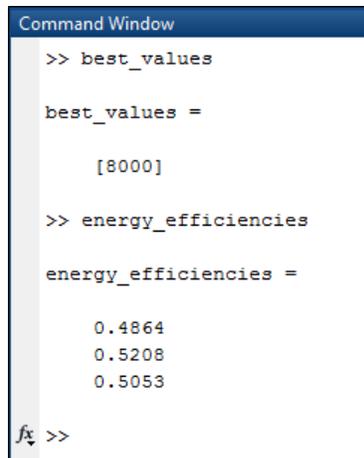
```

Figura 4.22. Tensões na carga medidas no Teste 4 na tela de comando do MatLab®.

qual é atribuída uma probabilidade de que esta seja conectada ou não. Para fins de simulação a probabilidade atribuída foi de 30% - valor alto, mas necessário para melhor observação dos efeitos da entrada da carga no circuito com um número não tão grande de ciclos simulados. Além disso, uma a carga é definida com variações pseudoaleatórias, sendo recalculada novamente a cada novo ciclo.

Na Figura 4.25 são definidos o valor médio e o desvio padrão que serão responsáveis pela variação não controlada da carga, além da probabilidade da entrada da carga clandestina na linha. Na linha 6, é definido o número de ciclos de simulação.

A Figura 4.26 mostra, nas linhas entre 33 e 37, a definição do valor da impedância da carga ilegal e o ponto do circuito onde ela entrará. É chamada a função interna ‘*random on or off*’, que apenas utiliza a probabilidade anteriormente definida para tomar a decisão de



```
Command Window
>> best_values

best_values =

    8000

>> energy_efficiencies

energy_efficiencies =

    0.4864
    0.5208
    0.5053

fx >>
```

**Figura 4.23.** Resultados do Teste 4 na tela de comando do MatLab<sup>®</sup>.

ligar ou não a carga. Nas linhas entre 39 e 44 a função *'netlist replace element value'* utiliza a função do MatLab<sup>®</sup> *'randn'* juntamente com as entradas de valor médio e desvio padrão mostrados na Figura 4.25 para gerar um valor pseudoaleatório de impedância para a carga. Ainda na Figura 4.26, nas linhas entre 47 e 53, são listados os elementos controláveis e seus possíveis valores, conforme indicado anteriormente na Tabela 4.9.

Uma vez configurado, o programa quando executado funciona da seguinte maneira, uma vez em cada ciclo:

- Define os elementos aleatórios: define se a carga ilegal entra ou não entra e define valor da carga principal;
- Avalia eficiência energética para todas as combinações de configurações controláveis e escolhe a melhor;
- Avalia a eficiência energética com todas as configurações originais, sem alterações controláveis;
- Guarda os valores de eficiência nas duas situações (adaptada e não adaptada) e reinicia o ciclo.

Os resultados mostrados na Tabela 4.10 e Figura 4.27 foram obtidos numa simulação com 8 ciclos. Apesar do exemplo em questão, existe a possibilidade de que a eficiência em ambos os casos seja igual em algum ciclo, mas a eficiência do circuito adaptado jamais será menor do que a do circuito não adaptado.

Uma nova simulação da mesma planta, com a mesmas configurações, mas desta vez rodando 25 ciclos ao invés de 8, retorna os resultados mostrados na Tabela 4.11 e Figura 4.28.

```
Command Window
>> abs(load_voltages)

ans =

    1.0e+03 *

    9.9992    9.9992    9.9992
    9.9969    9.9969    9.9969
    9.9876    9.9876    9.9876

>> best_values

best_values =

    [8000]    [10]

>> energy_efficiencies

energy_efficiencies =

    0.8387
    0.8282
    0.8222

fx >>
```

Figura 4.24. Resultado do Teste 5 na tela de comando do MatLab®.

```
1 - clear all; close all; clc
2
3 - load_resistance_std = 1000;
4 - load_resistance_mean = 10000;
5 - probability_illegal_load_in_phase3 = 0.3;
6 - number_trials = 10;
7
```

Figura 4.25. Entradas para o Teste 6: definição das variações não controláveis.

**Tabela 4.1.** Descrição do circuito para os Testes 1 e 4

Elemento	Tipo	Controlável	Parâmetro 1	Parâmetro 2
vin1	Fonte ( $3\phi - Y$ )	Par. 1	13, 8 ou 5 kV	-
vin2	Fonte ( $3\phi - Y$ )	-	10 kV	-
vin3	Fonte ( $3\phi - Y$ )	-	8 kV	-
vin4	Fonte ( $3\phi - Y$ )	-	10 kV	-
vin5	Fonte ( $3\phi - Y$ )	-	5 kV	-
zlineA1	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(9 + 6j)\Omega$	-
zlineA2	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(8 + 5j)\Omega$	-
zlineA3	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(5 + 2j)\Omega$	-
zlineA4	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(8 + 5j)\Omega$	-
zlineA5	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(3 + 1j)\Omega$	-
tr_up (5x)	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	100
zlineB1	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(80 + 40j)\Omega$	-
zlineB2	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(70 + 40j)\Omega$	-
zlineB3	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(50 + 20j)\Omega$	-
zlineB4	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(70 + 30j)\Omega$	-
zlineB5	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(20 + 10j)\Omega$	-
tr_downA (5x)	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	0.5
zlineC1	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(7 + 2j)\Omega$	-
zlineC2	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(8 + 2j)\Omega$	-
zlineC3	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(5 + 2j)\Omega$	-
zlineC4	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(6 + 1j)\Omega$	-
zlineC5	Linha (imp. $3\phi$ )	-	$(3 + 1j)\Omega$	-
tr_downB (1x)	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	0.5
zload1	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(8.000 - 6.00j)\Omega$	-
zload2	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(6.000 + 5.00j)\Omega$	-
zload3	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(8.000 + 6.00j)\Omega$	-
zload4	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(9.000 - 2.00j)\Omega$	-
zload5	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(6.000 - 3.00j)\Omega$	-
zload6	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(8.000 + 1.00j)\Omega$	-
zload7	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(9.000 + 6.00j)\Omega$	-

**Tabela 4.2.** Descrição do circuito para o Teste 2

Elemento	Tipo	Controlável	Parâmetro 1	Parâmetro 2
vin1	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	-	10 kV	-
vin2	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	-	10 kV	-
vin3	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	-	10 kV	-
zline1	Linha (impedância $3\phi$ )	Par. 1	(2.000, 4.000, 6.000 ou $8.000 + 1.000j$ ) $\Omega$	-
zline2	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(2000 + 1000j)\Omega$	-
zline3	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(2000 + 1000j)\Omega$	-
tr_up1	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	2
tr_up2	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	2
tr_up3	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	2
zload	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(30.000 + 2.000j)\Omega$	-

**Tabela 4.3.** Resultados do Teste 2: configurações e eficiências.

Configuração: impedância da linha	Eficiência
$(2000 + 1000j)\Omega$	0.9181
$(4000 + 1000j)\Omega$	0.9026
$(6000 + 1000j)\Omega$	0.8960
$(8000 + 1000j)\Omega$	0.8925

**Tabela 4.4.** Descrição do circuito para o Teste 3

Elemento	Tipo	Controlável	Parâmetro 1	Parâmetro 2
vin	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	-	500 V	-
zlineA	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(5 + 2j)\Omega$	-
tr_up	Trafo ( $3\phi - YY$ )	Parâmetro 2	100 H	1, 2 ou 10
zlineB	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(10 + 5j)\Omega$	-
tr_down	Trafo ( $3\phi - YY$ )	Parâmetro 2	100 H	1, 0.5 ou 0.1
zlineC	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(5 + 2j)\Omega$	-
zload	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(50 + 30j)\Omega$	-

**Tabela 4.5.** Resultados do Teste 3: configurações e eficiências.

Configuração: fatores de transformação	Eficiência
$tr\_up = 1 / tr\_down = 1$	0.7894
$tr\_up = 2 / tr\_down = 0.5$	0.8281
$tr\_up = 10 / tr\_down = 0.1$	0.8393

**Tabela 4.6.** Resultados do Teste 4: configurações e eficiências.

Configuração: tensão da fonte de entrada	Eficiência
13 kV	0.4864
8 kV	0.5208
5 kV	0.5053

**Tabela 4.7.** Descrição do circuito para o Teste 5

Elemento	Tipo	Controlável	Parâmetro 1	Parâmetro 2
vin	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	Parâmetro 1	8 kV, 4 kV ou 2 kV	-
zlineA	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(10 + 8j)\Omega$	-
tr_up	Trafo ( $3\phi - YY$ )	Parâmetro 2	100 H	10, 20 ou 40
zlineB	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(70 + 20j)\Omega$	-
tr_downA	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	0.5
zlineC	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(10 + 2j)\Omega$	-
tr_downB	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	0.25
zload	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(25.000 + 6.000j)\Omega$	-

**Tabela 4.8.** Resultados do Teste 5: configurações e eficiências.

Configuração: tensão da fonte de entrada	Eficiência
$vin = 8 \text{ kV} / tr\_up = 10$	0.8387
$vin = 4 \text{ kV} / tr\_up = 20$	0.8282
$vin = 2 \text{ kV} / tr\_up = 40$	0.8222

**Tabela 4.9.** Descrição do circuito para o Teste 6

Elemento	Tipo	Controlável	Parâmetro 1	Parâmetro 2
vin1	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	-	10 kV	-
vin2	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	Par. 1	5, 8 ou 13 kV	-
vin3	Fonte de tensão ( $3\phi - Y$ )	-	8 kV	-
zline1	Linha (impedância $3\phi$ )	Par. 1	$(1.000, 2.000, \text{ ou } 3.000 + 1.000j)\Omega$	-
zline2	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(1000 + 2000j)\Omega$	-
zline3	Linha (impedância $3\phi$ )	-	$(3000 + 1000j)\Omega$	-
tr_up1	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	2
tr_up2	Trafo ( $3\phi - YY$ )	-	100 H	2
tr_up3	Trafo ( $3\phi - YY$ )	Par. 2	100 H	1.8, 2.0 ou 2.2
zload	Carga ( $3\phi - Y$ )	-	$(30.000 + 12.000j)\Omega$	-

```

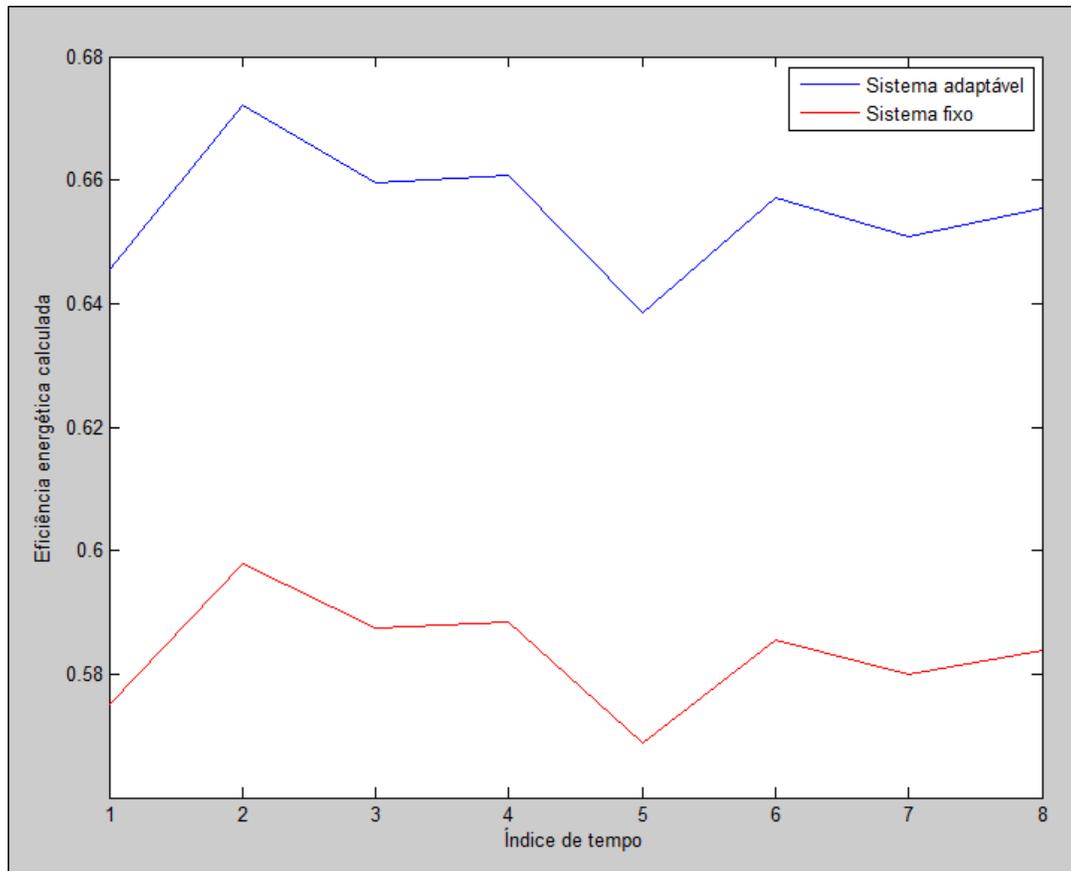
31
32 - for(k = 1 : number_trials)
33 -     if(random_on_or_off(probability_illegal_load_in_phase3))
34 -         netlist = netlistaddimpedance(netlist, 'zillegal', 'C_phase3', 'D',...
35 -             5000+1000*j);
36 -     else
37 -         netlist = netlistremoveelement(netlist, 'zillegal');
38 -     end
39 -     netlist = netlist_replace_element_value...
40 -     (netlist, 'zload', ...
41 -     @netlistaddimpedance_tripphase_star, 'zload', 'C', ...
42 -     'D', ...
43 -     randn(1,1) * load_resistance_std + ...
44 -     load_resistance_mean - 50 * j);
45 -     [best_values{k}, energy_efficiencies{k}, I] = ...
46 -     evaluate_all_controllable_configurations...
47 -     (netlist, {'zline1'; 'tr_up3'; 'vin2'}, ...
48 -     {@netlistaddimpedance_tripphase; @netlistaddtransformer_tripphase_star;...
49 -     @netlistaddsource_tripphase_star}, ...
50 -     {'zline1'; 'A1'; 'B1'; 'XX'};{'tr_up3', 'B3', 'C', 1e+5, 'XX'};...
51 -     {'vin2', 'A2', '0', 'XX'}}, ...
52 -     {{1000 + 1000 * j; 2000 + 1000 * j; 3000 + 1000 * j}; {1.8; 2.0; 2.2};...
53 -     {5e+3; 8e+3; 13e+3}}, ...

```

**Figura 4.26.** Entradas para o Teste 6: definição das variações não controláveis e configuração das entradas controláveis.

**Tabela 4.10.** Resultados do Teste 6: eficiências com e sem adaptação para simulação com 8 ciclos.

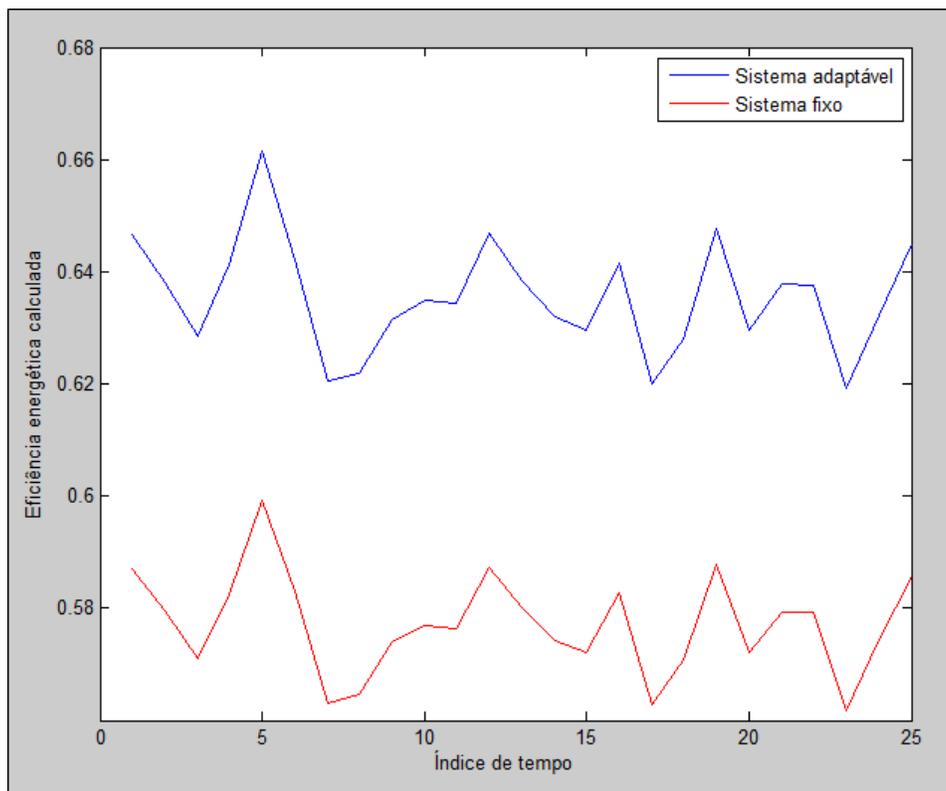
Ciclo	Eficiência sem adaptação	Eficiência com adaptação
1	0.5752	0.6456
2	0.5979	0.6722
3	0.5874	0.6595
4	0.5884	0.6606
5	0.5688	0.6386
6	0.5854	0.6572
7	0.5800	0.6510
8	0.5839	0.6555



**Figura 4.27.** Resultado do Teste 6: gráfico comparando eficiências nos casos adaptado e não adaptado com 8 ciclos.

**Tabela 4.11.** Resultados do Teste 6: eficiências com e sem adaptação para simulação com 25 ciclos.

Ciclo	Eficiência sem adaptação	Eficiência com adaptação
1	0.5870	0.6466
2	0.5796	0.6380
3	0.5712	0.6285
4	0.5825	0.6413
5	0.5992	0.6616
6	0.5831	0.6421
7	0.5630	0.6204
8	0.5646	0.6218
9	0.5738	0.6315
10	0.5770	0.6350
11	0.5765	0.6345
12	0.5873	0.6470
13	0.5800	0.6385
14	0.5743	0.6320
15	0.5721	0.6295
16	0.5826	0.6415
17	0.5627	0.6201
18	0.5708	0.6281
19	0.5879	0.6477
20	0.5722	0.6297
21	0.5794	0.6377
22	0.5793	0.6377
23	0.5617	0.6192
24	0.5745	0.6322
25	0.5856	0.6449



**Figura 4.28.** Resultado do Teste 6: gráfico comparando eficiências nos casos adaptado e não adaptado com 25 ciclos.

## 5 Conclusão

Em relação ao sistema e sua relação com o usuário, a utilização constante permitiu verificar a grande vantagem em dispor de funções capazes de descrever dispositivos trifásicos de forma simplificada. Conforme ilustrado em diversos momentos da dissertação, é possível descrever um mesmo circuito com um número substancialmente menor de linhas de comando, além das configurações padronizadas que deixam de ser entrada obrigatória, como defasagem de fontes e frequência de operação, por exemplo.

No entanto a utilização do sistema depende do conhecimento e do entendimento das funções, que são operadas por comandos que praticamente compõem uma linguagem própria. As funções e suas entradas foram desenvolvidas de forma que a utilização seja o mais intuitiva possível mas, assim como em qualquer sistema de simulação, é necessária instrução prévia.

A parte elétrica do sistema responde como esperado aos testes propostos para validação, retornando resultados corretos para medições de valor conhecido e valores coerentes para situações propostas com comportamento geral conhecido. As funções de alteração de configuração também foram testadas e funcionam corretamente, assim como a parte de análise de eficiência energética e a parte de escolha de melhor configuração.

Os resultados obtidos ilustram casos conhecidos de melhora de eficiência, testando alterações em linhas e fontes e suas implicações na eficiência do sistema. O teste completo mostra a capacidade do sistema em melhorar o desempenho de uma planta com possibilidade de ajustes de configuração, alcançando melhoras que ultrapassam os 5%.

Um possível próximo passo do projeto seria a simulação de uma planta real, que possibilitasse a medição e a comparação em testes mais avançados, levando as possibilidades de adaptação do sistema a outro nível. Outra atividade interessante seria a confecção de um manual de utilização do sistema, de modo a fornecer ao usuário uma ferramenta de consulta sempre disponível, tornando a aplicação acadêmica do sistema mais viável.

# Referências

- [1] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku. *Fundamentals of electric circuits*. McGraw-Hill, New York, NY, 5th edition, 2013. 2011025116 Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku. ill. (chiefly col.) ; 27 cm. Includes bibliographical references and index.
- [2] A. Cross and D. Strickland. Using spice for power system simulations. In *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, pages 1–10, Aug 2011.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil - 3ª Edição*, 2008.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. *Revista Eficiência Energética: A busca da articulação entre ações de incentivo*, 2013.
- [5] Ministério de Minas e Energia MME. *Plano Nacional de Eficiência Energética*, 2011.
- [6] Richard C. Dorf and James A. Svoboda. *Introduction to electric circuits*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 8th edition, 2010. 2009047257 Richard C. Dorf and James A. Svoboda. ill. ; 26 cm. Includes index.
- [7] F. V. M. Moraes e J. B. M. Mallmann. *Tutorial do Simulador SPICE*, 2007.
- [8] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, and Stephen D. Umans. *Electric machinery*. McGraw-Hill series in electrical engineering Power and energy. McGraw-Hill, Boston, Mass., 6th edition, 2003. 2002070988 (Arthur Eugene), A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans. ill. 24 cm.
- [9] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, and Thomas J. Overbye. *Power system analysis and design*. Cengage Learning, Stamford, CT, 5th edition, 2012. 2010941448 J. Duncan Glover, Mulukutia S. Sarma, Thomas J. Overbye. ill. ; 24 cm. Includes bibliographical references and index.
- [10] Allan R. Hambley. *Electrical engineering : principles and applications*. Pearson Education, Upper Saddle River, N.J., 5th edition, 2011. 2009038177 Allan R. Hambley. ill. ; 27 cm. + 1 DVD-ROM (4 3/4 in.) Includes index. Introduction – Resistive circuits – Inductance and capacitance – Transients – Steady-state sinusoidal analysis – Frequency response, bode plots, and resonance – Logic circuits – Microcomputers –

Computer-based instrumentation systems – Diodes – Amplifiers : specifications and external characteristics – Field-effect transistors – Bipolar junction transistors – Operational amplifiers – Magnetic circuits and transformers – DC machines – AC machines – Appendix A : Complex numbers – Appendix B : Nominal values and the color code for resistors – Appendix C : The fundamentals of engineering examination – Appendix D : Computer-aided circuit analysis with SPICE-based software – Appendix E : Answers for the practice tests – Appendix F : Software and on-line student resources – Appendix G : OrCAD 10.5 tutorial.

- [11] MathWorks Inc. *The student edition of MATLAB : the ultimate computing environment for technical education : user's guide*. The MATLAB curriculum series. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995. 94043322 the MathWorks Inc. ; with tutorial by Duane Hanselman and Bruce Littlefield. MATLAB ill. (some col.) ; 24 cm. Includes index. On cover version 4.
- [12] L. Michel, A. Cheriti, and P. Sicard. Physical and system power electronics simulator based on a spice kernel. In *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2010 IEEE 12th Workshop on*, pages 1–6, June 2010.
- [13] C. C. Barioni de Oliveira N. Kagan and E. J. Robba. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Blusher, New York, NY, 2nd edition, 2010. 9788521205395 N. Kagan, C. C. Barioni de Oliveira and E. J. Robba; 27 cm. Includes bibliographical references and index.
- [14] P. Noonan and M. Wahby. Novel use of graphical system design tools and spice to exploring efficiency in power simulation. In *Green Technologies Conference, 2013 IEEE*, pages 71–77, April 2013.
- [15] Rudra Pratap. *Getting started with MATLAB : a quick introduction for scientists and engineers*. Oxford University Press, New York, 2010. 2009028033 Rudra Pratap. ill. ; 24 cm. Includes bibliographical references (p. [261] and index. Introduction – Tutorial lessons – Interactive computation – Programming in MATLAB : scripts and functions – Applications – Graphics – Errors – Computer algebra and the symbolic math toolbox – Honorable mentions – Appendix: The MATLAB language reference.