



**Universidade Estadual de Londrina**  
Centro de Tecnologia e Urbanismo  
Departamento de Engenharia Elétrica

**David Maykon Krepsky Silva**

# **Fluxo de potência para sistemas de distribuição com otimização por redução de barras**

Londrina  
2016

**Universidade Estadual de Londrina**

Centro de Tecnologia e Urbanismo  
Departamento de Engenharia Elétrica

---

**David Maykon Krepsky Silva**

**Fluxo de potência para sistemas de distribuição com  
otimização por redução de barras**

Trabalho de Conclusão de Curso orientado pelo Prof. Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja intitulado “Fluxo de potência para sistemas de distribuição com otimização por redução de barras” e apresentada à Universidade Estadual de Londrina, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja

---

Londrina  
2016

### **Ficha Catalográfica**

David Maykon Krepsky Silva

Fluxo de potência para sistemas de distribuição com otimização por redução de barras - Londrina, 2016 - 32 p., 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja

1. Fluxo de potência. 2. Método de varredura. 3. Sistemas de distribuição. 4. Sistema tri-fásico 5. Otimização

I. Universidade Estadual de Londrina. Curso de Engenharia Elétrica. II. Fluxo de potência para sistemas de distribuição com otimização por redução de barras.

David Maykon Krepsky Silva

# Fluxo de potência para sistemas de distribuição com otimização por redução de barras

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja  
Universidade Estadual de Londrina  
Orientador

---

M.Sc. Osni Vicente  
Universidade Estadual de Londrina

---

Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes  
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 10 de janeiro de 2016

Dedico este trabalho especialmente para minha filha,  
por ser minha fonte de inspiração, força e coragem.

# Agradecimentos

A minha família, que, diante de todas as adversidades encontradas, lutou e tornou este trabalho possível.

Ao meu orientador Dr. Luis Alfonso Gallego Pareja, pela disposição, paciência e compreensão.

Ao meu grande amigo e sócio Heitor Henrique Freire Arns, por me aturar e motivar a seguir em frente, independente das barreiras encontradas.

A UEL e o Dep. de Engenharia Elétrica, que me proporcionaram a oportunidade desta graduação e pela excelência no serviço prestado.

A todos meus amigos que se mostraram presentes nos últimos anos.

E a todos aquele que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.

*“May God bless and keep you always,  
May your wishes all come true,  
May you always do for others  
And let others do for you.  
May you build a ladder to the stars  
And climb on every rung,  
May you stay, forever young.”*  
(Bob Dylan)

**David Maykon Krepsky Silva.** 2016. 32 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

## Resumo

Devido ao aumento no consumo de energia elétrica nos últimos anos, os sistemas de distribuição estão maiores e mais complexos. Assim, torna-se cada vez mais comum o uso do fluxo de potência para melhorar a qualidade e o desempenho das redes de distribuição. Os métodos tradicionais de cálculo do fluxo de potência, como os métodos de Newton-Raphson e Gauss-Seidel, apresentam problemas de desempenho e convergência devido as características peculiares dos sistemas de distribuição, sendo necessário um algoritmo rápido e robusto para possibilitar sua aplicação nesses sistemas. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre dois métodos de varredura, trifásicos, populares na literatura, de modo a avaliar a velocidade e a convergência dos mesmos para sistemas radiais com 14, 34, 69, 136, 700 e 3000 barras. Também é proposto um algoritmo para otimização do cálculo do fluxo de potência através da remoção de barras redundantes e compensação desacoplada. O primeiro método avaliado, originalmente proposto por (SHIRMOHARMNADI, 1988), consiste na aplicação direta das leis de Kirchhoff. O segundo método, descrito por (CESPEDES, 1990), utiliza a Lei de Ohm, eliminando a fase da tensão nas equações do fluxo de potência, possibilitando uma simplificação dos cálculos. De acordo com as simulações realizadas, os dois métodos se mostram robustos em relação a convergência, não apresentando problemas e utilizando poucas iterações nos sistemas analisados. Ambos os métodos possuem desempenho parecido, no quesito velocidade, para sistemas de poucas barras, porém, para sistemas grandes (700 e 3000 barras), a diferença se torna evidente, sendo o segundo método, aproximadamente, duas vezes mais rápido que o primeiro. O método de otimização proposto se mostrou capaz de reduzir drasticamente o tempo computacional utilizado, contudo, devido a compensação desacoplada, é introduzido uma pequena variação no resultado para as barras que foram otimizadas. Devido a redução no número de barras utilizadas na elaboração do fluxo de potência com a otimização ativada, ambos os métodos possuem tempo computacional semelhante, diferenciando apenas por alguns milissegundos.

**Palavras-Chave:** 1. Fluxo de potência. 2. Método de varredura. 3. Sistemas de distribuição. 4. Sistema tri-fásico 5. Otimização



**Power flow for distribution systems with optimization trough bars reduction.**  
2016. 32 p. Monograph in Engenharia Elétrica- Universidade Estadual de Londrina,  
Londrina.

## Abstract

....

**Key-words:** 1. Power flow. 2. Backward-Forward Sweep. 3. Distribution systems. 4.  
Three-phase systems 5. Optimization

# Lista de ilustrações

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Diagrama de um sistema elétrico de potência. . . . .                     | 19 |
| Figura 2 – Sistema Interligado Nacional (SIN). . . . .                              | 20 |
| Figura 3 – Fonte para produção de energia elétrica em 2014. . . . .                 | 20 |
| Figura 4 – Perdas elétricas de transmissão e distribuição em %. . . . .             | 22 |
| Figura 5 – Perfil de consumo de energia elétrica no Brasil, julho de 2015. . . . .  | 23 |
| Figura 6 – Perdas por tipo das 10 maiores distribuidoras de energia elétrica. . . . | 24 |

# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh) . . . . . | 21 |
| Tabela 2 – Usinas em construção no Brasil em 2014. . . . .      | 21 |
| Tabela 3 – Perdas totais na rede em 2014. . . . .               | 23 |

# Lista de Siglas e Abreviaturas

|                 |   |
|-----------------|---|
| ANEEL           | Agência Nacional de Energia Elétrica        |
| AT              | Alta Tensão                                 |
| BT              | Baixa Tensão                                |
| GW <sub>H</sub> | Giga Watt Hora                              |
| kW <sub>H</sub> | Kilo Watt Hora                              |
| MT              | Média Tensão                                |
| ONS             | Operador Nacional do Sistema Elétrico       |
| SDE             | Sistema de Distribuição de Energia Elétrica |
| SEP             | Sistema Elétrico de Potência                |
| SIN             | Sistema Interligado Nacional                |
| UC              | Unidade Consumidora                         |

# Lista de Símbolos e Notações

|                    |  |
|--------------------|--|
| $A$                | Relacionado com a amplitude do sinal                                       |
| $A_{max}$          | Máximo valor de amplitude do sinal recebido                                |
| $\mathbf{A}$       | Matriz de amplitudes do sinal  |
| $\mathcal{A}$      | Matriz de amplitudes do sinal para um <i>frame</i> transmitido             |
| $b$                | Relacionado ao bit transmitido   |
| $\mathbf{b}$       | Vetor de bits transmitidos   |
| $\mathbf{B}$       | Matriz de bits transmitidos  |
| $c$                | Relacionado ao coeficiente complexo do canal                               |
| $\mathbf{C}$       | Matriz de coeficientes complexos do canal                                  |
| $\mathcal{C}$      | Matriz de coeficientes complexos do canal para um <i>frame</i> transmitido |
| $c_{luz}$          | Velocidade da luz no vácuo   |
| $D$                | Diversidade Rake   |
| $E_b$              | Energia de bit   |
| $E_b/N_o$          | Relação energia de bit recebido e densidade espectral de potência de ruído |
| $f_D$              | Frequência Doppler   |
| $f_c$              | Frequência da portadora  |
| $a, \mu, A$        | Letra em itálico: trata-se de um escalar                                   |
| $\mathbf{a}$       | Letra minúscula e negrito: trata-se de um vetor                            |
| $\mathbf{A}$       | Letra maiúscula e negrito: trata-se de uma matriz                          |
| $\hat{a}$          | Valor estimado de uma dada variável $a$                                    |
| $\bar{a}$          | Valor médio de uma dada variável $a$                                       |
| $\underline{a}$    | Versão discretizada (binária) de $a$                                       |
| $\arctan\{\cdot\}$ | Operador arco tangente   |
| $\arg\{\cdot\}$    | Operador que retorna o argumento   |
| $\{\cdot\}^T$      | Operador matriz transposta   |
| $\{\cdot\}^*$      | Conjugado complexo   |
| $\{\cdot\}^{-1}$   | Operador matriz inversa  |
| $ \cdot $          | Operador valor absoluto (módulo)   |
| $\angle x$         | Operador fase do número complexo $x$                                       |
| $\Im\{\cdot\}$     | Operador parte imaginária  |
| $\Re\{\cdot\}$     | Operador parte real  |
| $\text{round}(x)$  | Operador inteiro mais próximo de $x$                                       |
| $\min[\cdot]$      | Valor mínimo assumido pelo argumento                                       |
| $\max[\cdot]$      | Valor máximo assumido pelo argumento                                       |

Palavras em *itálico* são empregadas para identificar termos de língua inglesa não traduzidos.

# Sumário

|     |  |    |
|-----|--|----|
|     | Lista de ilustrações . . . . .   | 9  |
|     | Lista de tabelas . . . . .   | 10 |
|     | Sumário . . . . .  | 14 |
| 1   | INTRODUÇÃO . . . . .   | 15 |
| 1.1 | Motivação e justificativa . . . . .  | 15 |
| 1.2 | Objetivos . . . . .  | 16 |
| 1.3 | Metodologia . . . . .  | 16 |
| 1.4 | Organização do trabalho . . . . .  | 17 |
| 2   | ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL . . . . .   | 19 |
| 2.1 | Sistema Elétrico de Potência brasileiro . . . . .                                  | 19 |
| 2.2 | Fontes de energia elétrica . . . . .   | 20 |
| 2.3 | Perdas do sistema . . . . .  | 22 |
| 2.4 | Ferramentas computacionais para melhoria dos sistemas de<br>distribuição . . . . . | 24 |
| 3   | SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO . . . . .   | 25 |
| 4   | MÉTODOS DE VARREDURA . . . . .   | 26 |
| 5   | OTIMIZAÇÃO POR REDUÇÃO DE BARRAS . . . . .   | 28 |
| 6   | DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO . . . . .                                       | 29 |
| 7   | RESULTADO DAS SIMULAÇÕES . . . . .   | 30 |
| 8   | CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .   | 31 |
|     | REFERÊNCIAS . . . . .  | 32 |

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação e justificativa

Desde a descoberta das cargas elétricas por Tales de Mileto na Grécia antiga, a energia elétrica vem promovendo mudanças radicais na sociedade e no meio ambiente, sendo esse fato mais evidente nas últimas décadas, com o advento dos computadores, equipamentos industriais, satélites de telecomunicações e etc. Sua importância é tão grande que muitas vezes é usada como índice de desenvolvimento dos países e sua disponibilidade implica diretamente na qualidade de vida do ser humano.

A expansão populacional dos últimos séculos e o desenvolvimento tecnológico fazem com que seja necessário uma produção cada vez maior de energia. Contudo, ampliar a capacidade de produção de energia elétrica gera impactos ambientais grandes, como na construção de uma nova usina termo-elétrica, que emite grandes quantidades de gás  $CO_2$  na queima de gás natural, derivados do petróleo ou biomassa ou utiliza combustível nuclear, gerando lixo radioativo de difícil descarte, ou em uma hidrelétrica, que requer a inundação de uma vasta área e modifica todo o ecossistema local.

Deve-se aumentar a oferta de energia elétrica, gerando impactos ambientais minimizados e a um custo acessível, para viabilizar a sua utilização, de modo sustentável, por toda a sociedade.

Nos últimos anos, o problema ambiental vem sendo abordado através da utilização cada vez maior de energias renováveis e limpas, como a energia solar e a eólica. Porém, tais fontes de energia ainda apresentam um custo elevado por kilowatt produzido.

O viés utilizado para promover a acessibilidade à energia é o da melhora na eficiência dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, com foco na redução das perdas e aprimoramento da qualidade e estabilidade da energia elétrica entregue ao consumidor.

Muitos trabalhos tem sido desenvolvidos nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo dada uma atenção cada vez maior aos sistema de distribuição, pois é onde se encontram as maiores perdas (tanto técnicas quanto não-técnicas) e é a parte mais vulnerável a falhas. Outro motivo para o aumento no interesse em sistemas de distribuição é a possibilidade da inserção de geradores distribuídos, *smart grids* e a capacidade de otimização da rede em tempo real.

Desta forma, este trabalho se justifica na necessidade de ferramentas que melhorem os sistemas de distribuição de energia elétrica, tornando-os mais eficientes e confiáveis.



## 1.2 Objetivos

Os objetivos primários são:

- implementação dos métodos soma de correntes e soma de potências para o cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais;
- comparação de desempenho entre os métodos;
- desenvolvimento e análise do algoritmo de otimização do fluxo de potência por redução de barras com compensação desacoplada.

Para realizar as simulações, foi elaborado, como objetivo secundário, o desenvolvimento de um programa gráfico para análise de sistemas de distribuição utilizando os algoritmos acima citados.

## 1.3 Metodologia

Tendo em vista à necessidade de desempenho e o gasto de recursos computacionais do fluxo de potência para sistemas de distribuição, foi adotada a linguagem de programação *C++* para a implementação dos algoritmos, pois a mesma possui uma boa relação entre velocidade de execução e complexidade do código fonte. De modo a facilitar o desenvolvimento da parte gráfica, foi utilizado o *framework* Qt, o qual possui uma extensa biblioteca de classes e funções em C++ para o desenvolvimento de aplicações multiplataforma.

O computador utilizado para realizar as simulações possui as seguintes configurações:

- processador Intel ® Core™ i5-3330 CPU @ 3.00GHz;
- memória RAM Kingston de 4GB 1333MHz;
- HD Seagate 750GB ST3750640NS;
- sistema operacional Ubuntu 15.10 x64.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho segue as seguintes etapas:

1. desenvolvimento da interface gráfica inicial;
2. implementação dos algoritmos do fluxo de potência;
3. implementação da otimização por redução de barras;
4. análise de performance para vários sistemas de distribuição.

## 1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentadas informações gerais sobre a atual situação do setor de energia elétrica no Brasil. São analisadas as características do sistema elétrico, as fontes de energia, e os fatores que influenciam o preço do kilowatt. Esse capítulo também evidencia as perdas no sistema elétrico e mostra uma comparação em nível internacional das perdas e do custo da energia elétrica, apresentando algumas técnicas que melhoram a eficiência e estabilidade do sistema.

O Capítulo 3 explora as características e componentes dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDE). Faz-se uma introdução aos métodos de Newton-Raphson e de Gauss-Seidel, considerados os métodos clássicos na solução do fluxo de potência, de modo a evidenciar os motivos pelos quais os mesmos apresentam problemas de desempenho e convergência.

No Capítulo 4 é apresentado o modelo de linha de transmissão utilizado e são descritos os dois métodos de varredura (soma das potências e soma das correntes) empregados no cálculo do fluxo de potência para sistemas de distribuição, bem como suas limitações teóricas e práticas. É discutido como o fluxo de potência auxilia no melhoramento dos SDEs e a necessidade de algoritmos robustos e rápidos. São abordadas também outras ferramentas que utilizam o fluxo de potência para aprimorar o custo e a qualidade da energia nos SDEs, como o fluxo ótimo, algoritmos de detecção de furto de energia e os *Smart Grids*.

No Capítulo 5 é apresentado o método de otimização proposto, junto com seu desenvolvimento matemático e as suas implicações. Para facilitar a compreensão, o capítulo anexa um fluxograma do algoritmo e uma sugestão de implementação.

No Capítulo 6 é apresentado o programa resultante deste trabalho, a sua organização em termos de software, a abordagem orientada a objetos utilizada para a implementação do fluxo de potência e modelagem dos elementos, suas funcionalidades e suas limitações.

O Capítulo 7 trata da apresentação quantitativa dos resultados obtidos com o uso da ferramenta computacional desenvolvida. São apresentados os resultados dos cálculos para os sistemas de 34 e 69 barras, sendo realizada uma verificação entre o resultado obtido por cada um dos métodos, com e sem otimização, de modo verificar a diferença numérica resultante. Também é analisado o tempo e o número de iterações utilizado por cada

algoritmo para os sistemas de 14, 34, 69, 136, 700 e 3000 barras para determinar qual o método mais rápido e qual o impacto da otimização. Por ultimo, é feita uma observação em relação a convergência dos métodos.

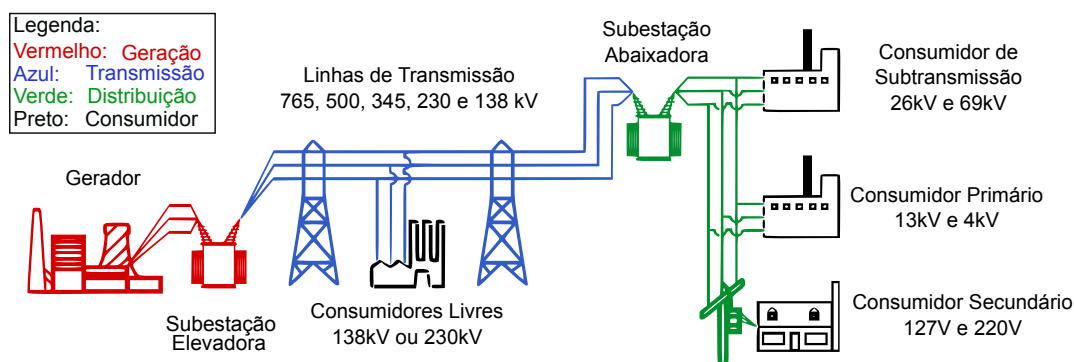
No Capitulo 8 são apresentadas as conclusões referentes à metodologia utilizada e as técnicas empregadas para execução desta monografia. É feita uma análise qualitativa dos resultados obtidos e de sua importância. São discutidas as dificuldades encontradas durante a execução deste trabalho e os mecanismos utilizados para superar as mesmas. Por fim, são apresentadas algumas ideias para trabalhos futuros, de modo a desenvolver a área de sistemas elétricos de potência.

## 2 Energia elétrica no Brasil

### 2.1 Sistema Elétrico de Potência brasileiro

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro é definido como o conjunto de instalações e equipamentos destinados a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, regulamentado em 1978 pela Portaria Nº 3.214. Esse sistema inclui desde as usinas geradoras até os equipamentos de medição nas unidades consumidoras e está presente em todo território nacional. A figura 1 exibe um diagrama com os principais componentes de um SEP e suas tensões de trabalho.

Figura 1 – Diagrama de um sistema elétrico de potência.



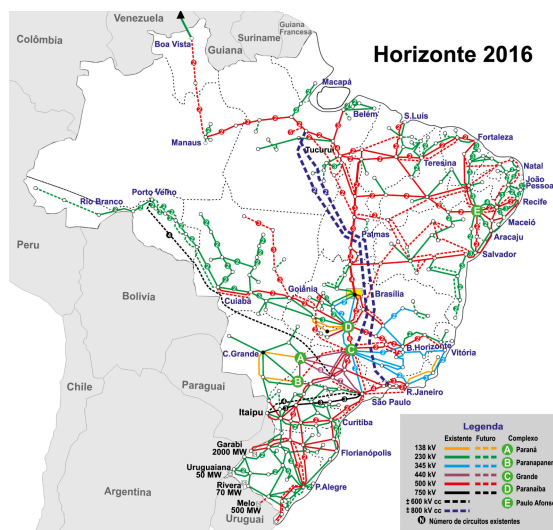
Fonte: *United States Department of Energy*, 2014<sup>1</sup>.

As usinas geradoras e a infraestrutura de transmissão constituem Sistema Interligado Nacional (SIN), mostrado na figura 2, e fornecem 98,3% da energia elétrica consumida no país (ONS, 2015). Os 1,7% restantes encontram-se em pequenos sistemas, chamados sistemas isolados, localizados em sua grande maioria na região amazônica. O órgão responsável pela operação e manutenção do SIN é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que, desde 26 de agosto de 1998, trabalha para garantir a segurança, continuidade e a economicidade do suprimento de energia elétrica para o país.

O sistemas de distribuição (elementos em verde na figura 1) é o responsável por receber a energia em alta tensão do SIN e entregá-la aos consumidores a um nível de tensão adequado. Esse sistema é controlado por 67 empresas, denominadas concessionárias de energia elétrica, que operam sob fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e entregam energia para as mais de 77 milhões de unidades consumidoras (UC) (MME, 2015).

<sup>1</sup> Tradução do autor.

Figura 2 – Sistema Interligado Nacional (SIN).

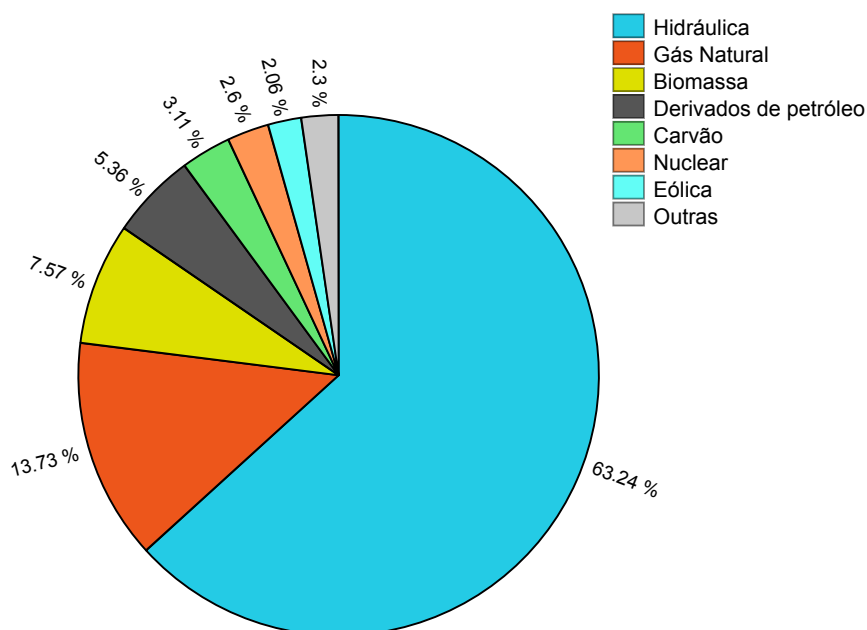


Fonte: Dados Relevantes 2014, ONS.

O termo unidade consumidora se refere ao conjunto de instalações e equipamentos elétricos, pertencentes a um consumidor, que recebe energia elétrica através de um único ponto de entrega, com medição individual.

## 2.2 Fontes de energia elétrica

Figura 3 – Fonte para produção de energia elétrica em 2014.



Fonte: Autoria própria<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Dados de EPE (2015).

Devido a abundância de cursos d'água, a principal fonte de energia elétrica no Brasil é a hídrica. Apesar de ser um recurso renovável, as usinas hidrelétricas, que compõem 63% da geração total (figura 3), vem apresentando problemas para suprir a demanda crescente. Longos períodos de estiagem diminuem os reservatórios, resultando em um aumento no uso de energia termelétrica, que é mais cara e mais poluente. Sendo assim, o custo do kWh é diretamente influenciado pelo índice pluviométrico na região das usinas (ANEEL, 2015a).

Tabela 1 – Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh)

|                 | 2010          | 2011          | 2012          | 2013          | 2014          | $\Delta\%_{2010-2014}$ |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| Gás Natural     | 36476         | 25095         | 46760         | 69003         | 81075         | 122,3                  |
| Hidráulica      | 403290        | 428333        | 415342        | 390992        | 373439        | -7,4                   |
| Deriv. Petróleo | 14216         | 12239         | 16214         | 22090         | 31668         | 122,8                  |
| Carvão          | 6992          | 6485          | 8422          | 14802         | 18385         | 163,0                  |
| Nuclear         | 14523         | 15659         | 16038         | 15450         | 15379         | 5,9                    |
| Biomassa        | 131209        | 31633         | 34662         | 39679         | 44733         | 43,3                   |
| Eólica          | 2177          | 2705          | 5050          | 6578          | 12210         | 460,9                  |
| Outras          | 6916          | 9609          | 10010         | 12241         | 13590         | 96,5                   |
| <b>Total</b>    | <b>515799</b> | <b>531758</b> | <b>552498</b> | <b>570835</b> | <b>590479</b> | <b>14,5</b>            |

Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015, Empresa de Pesquisa Energética.

A tabela 1 apresenta a quantidade de energia produzida de acordo com a fonte utilizada e sua variação entre os anos de 2010 e 2014. Nota-se que mesmo com o crescimento da demanda, a utilização de recursos hídricos sofreu uma redução no período avaliado, enquanto a geração térmica (gás natural, derivados de petróleo, carvão e biomassa) aumentou consideravelmente.

Tabela 2 – Usinas em construção no Brasil em 2014.

| Tipo                 | Quantidade |
|----------------------|------------|
| Hidrelétrica         | 11         |
| Eolielétrica         | 131        |
| Termelétrica         | 28         |
| Termonuclear         | 1          |
| PCH                  | 41         |
| Central Hidrelétrica | 1          |

Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015, Empresa de Pesquisa Energética.

Embora a quantidade de energia eólica utilizada tenha sido relativamente baixa (menor que 5% da produção total), os programas de incentivo fiscal, a exemplo do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), e o investimento no setor tem apresentado resultados significativos, como o crescimento de mais de 4 vezes na quantidade de energia elétrica produzida para a geração eólica em 5 anos. Em con-

junto com os dados da tabela 2, que expõe a grande quantidade de parques eólicos sendo construídos em 2014, fica evidente que há uma tendência crescente no uso dessas fontes alternativas de energia. Isso culmina em uma diversificação da matriz energética do país, reduzindo a emissão de poluentes e tornando-a menos vulnerável a escassez de um ou outro determinado recurso.

## 2.3 Perdas do sistema

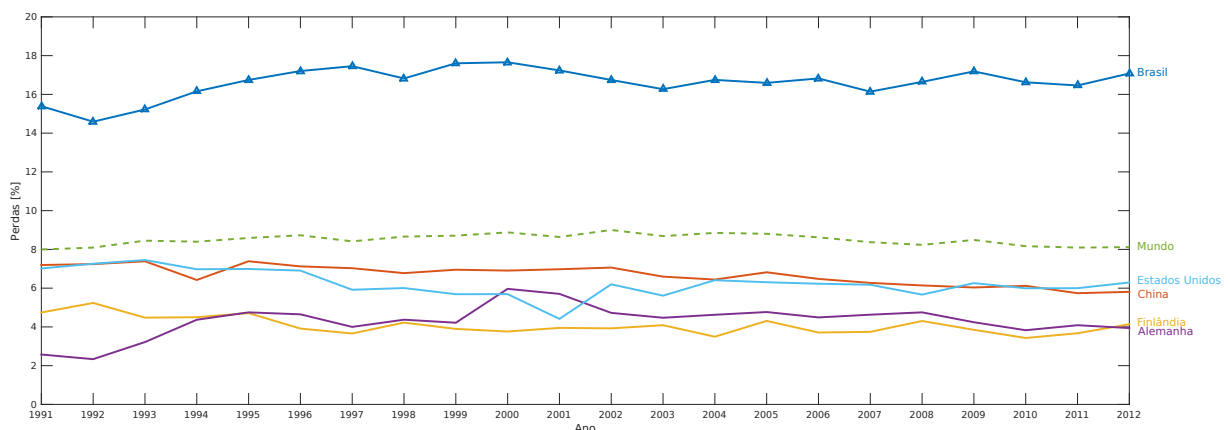
As perdas são parte intrínseca dos SEPs, não podendo ser evitadas e sim reduzidas a níveis aceitáveis. Essas são divididas em duas categorias, de acordo com sua origem, em perdas técnicas e não-técnicas.

As perdas técnicas são inerentes do transporte da energia e sua conversão para os diferentes níveis de tensão utilizados. São causadas principalmente pelo efeito Joule e pela fuga de corrente e estão presente nos cabos, transformadores, isoladores e outros equipamentos que compõem o SEP.

Já as perdas não-técnicas estão relacionadas ao processo de comercialização e distribuição, sendo causadas por erros de medição, fraudes e, em sua maior parte, furto de energia (conhecido popularmente como "gato").

A soma das perdas técnicas e não-técnicas é denominada perdas totais do sistema e serve como indicador da eficiência do sistema.

Figura 4 – Perdas elétricas de transmissão e distribuição em %.



Fonte: Autoria própria<sup>3</sup>.

A figura 4 apresenta um quadro comparativo entre as perdas totais do sistema elétrico brasileiro e de outros quatro países (China, Estados Unidos, Finlândia e Alemanha), bem como a média mundial (traçado em verde).

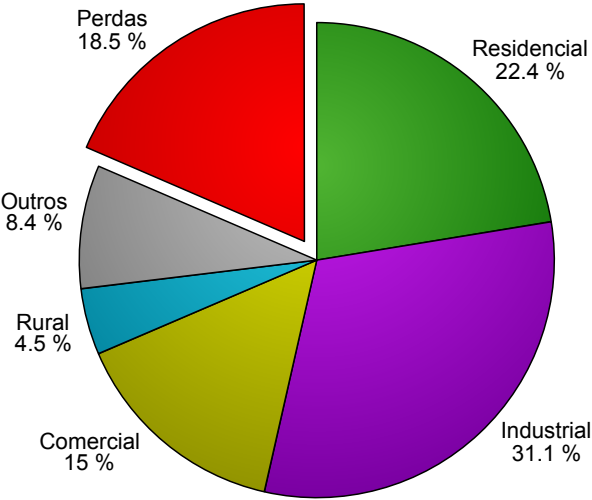
Nota-se que, mesmo possuindo um território maior que o do Brasil, Estados Unidos e China tem um melhor desempenho no setor de energia elétrica. O percentual de perdas

<sup>3</sup> Dados de Bank (2015).

do país (aproximadamente 17% em 2012) encontra-se acima média mundial (8%), sendo que em países tidos como referência em eficiência (Alemanha e Finlândia) as perdas correspondem a 4%.

Esses fatos indicam a necessidade de melhorias no SEP nacional. Essa necessidade é mais evidente quando observa-se o perfil de consumo de energia elétrica do país (figura 5), onde as perdas foram maiores que toda energia elétrica consumida pelo setor comercial e estão próximas do valor utilizado pelo setor residencial.

Figura 5 – Perfil de consumo de energia elétrica no Brasil, julho de 2015.



Fonte: Autoria própria<sup>4</sup>.

Os dados apresentados até agora correspondem a média nacional, assim, em algumas regiões as perdas ultrapassam 20% (caso da região norte), chegando a mais de 60% nos sistemas isolados, conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3 – Perdas totais na rede em 2014.

| Sistema                            | Perdas (%)        |
|------------------------------------|-------------------|
| Sistemas Isolados                  | 64,7 <sup>5</sup> |
| Sistema Interligado Nacional (SIN) | 17,4              |
| Norte                              | 25,7              |
| Nordeste                           | 18,3              |
| Sudeste/C.Oeste                    | 17,2              |
| Sul                                | 13,6              |

Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015, Empresa de Pesquisa Energética.

Em algumas regiões as perdas não técnicas são maiores, mas no geral as perdas técnicas são responsáveis pela maior parte da baixa eficiência do SEP brasileiro. O gráfico da figura 6 reuni informações sobre o tipo de perda das 10 maiores, em quantidade de unidades

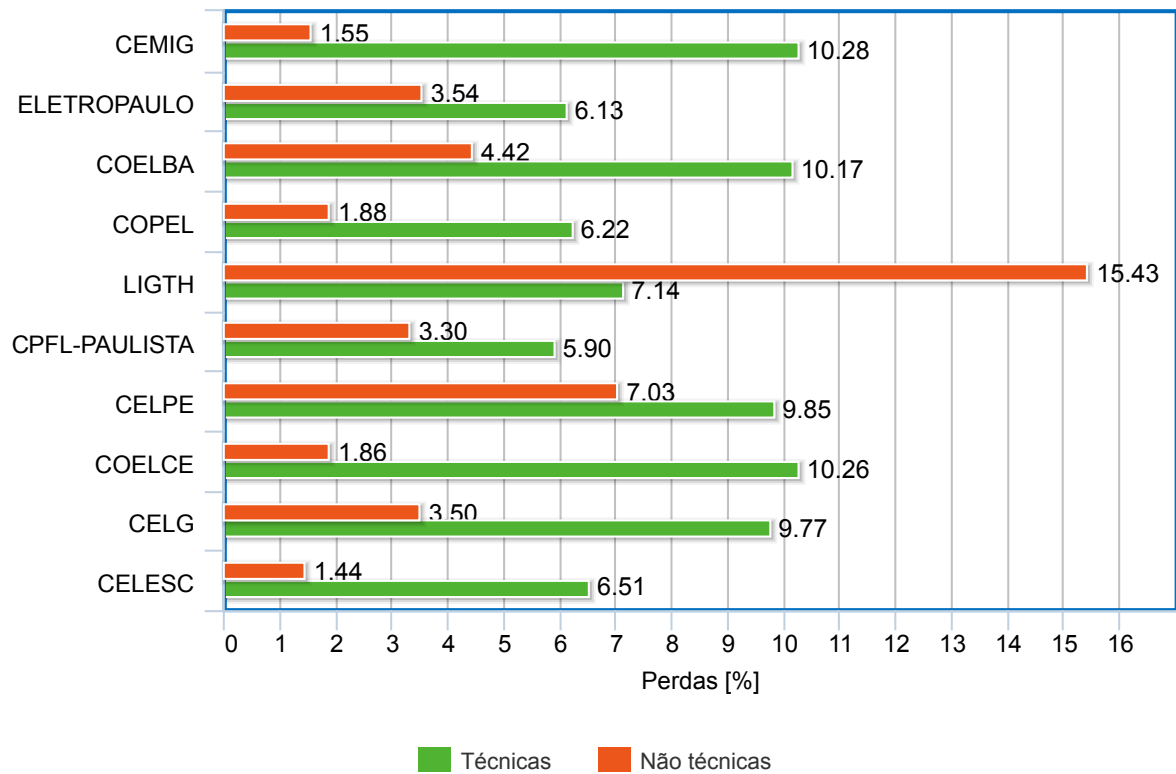
<sup>4</sup> Dados MME (2015).

<sup>5</sup> Nota do autor: o valor é elevado devido as perdas não-técnicas.



consumidoras, distribuidoras de energia elétrica do país. Fica evidente a predominância das perdas decorrente do transporte da energia.

Figura 6 – Perdas por tipo das 10 maiores distribuidoras de energia elétrica.



Fonte: Autoria própria<sup>6</sup>.

## 2.4 Ferramentas computacionais para melhoria dos sistemas de distribuição

- fluxo de potencia - fluxo otimo - smart grid

<sup>6</sup> Dados ANEEL (2015b).

### **3   Sistemas de distribuição**

## 4 Métodos de varredura

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

$$I = \frac{S^*}{V^*}$$

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}^*}{\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}^*} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

Multiplicando ambos os lados por  $[V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^*$  temos:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^* - \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^* = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

Como  $C \cdot C^* = |C|^2$ :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} V_{ra}^* \\ V_{sb} V_{rb}^* \\ V_{sc} V_{rc}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} |V_{ra}|^2 \\ |V_{rb}|^2 \\ |V_{rc}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

$$C = |C|(\cos(\theta) + j \sin(\theta))$$

$$\begin{bmatrix} |V_{sa}| |V_{ra}| (\cos \theta_{sra} + j \sin \theta_{sra}) \\ |V_{sb}| |V_{rb}| (\cos \theta_{srb} + j \sin \theta_{srb}) \\ |V_{sc}| |V_{rc}| (\cos \theta_{src} + j \sin \theta_{src}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} |V_{ra}|^2 \\ |V_{rb}|^2 \\ |V_{rc}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

De modo genérico, temos que:

$$|V_{sx}| |V_{rx}| (\cos \theta_{srx} + j \sin \theta_{srx}) - |V_{rx}|^2 = S_a^* Z_{xa} + S_b^* Z_{xb} + S_c^* Z_{xc}$$

Separando os termos reais dos imaginários:

$$|V_{sx}| |V_{rx}| \cos \theta_{srx} - |V_{rx}|^2 = \Re \{ S_a^* Z_{xa} + S_b^* Z_{xb} + S_c^* Z_{xc} \}$$

$$|V_{sx}||V_{rx}|sen\theta_{srx} = \Im\{S_a^*Z_{xa} + S_b^*Z_{xb} + S_c^*Z_{xc}\}$$

Em função do seno e cosseno:

$$cos\theta_{srx} = \frac{\Re_{S^*Z} + |V_{rx}|^2}{|V_{sx}||V_{rx}|}$$

$$sen\theta_{srx} = \frac{\Im_{S^*Z}}{|V_{sx}||V_{rx}|}$$

Onde:

$$\Re_{S^*Z} = \Re\{S_a^*Z_{xa} + S_b^*Z_{xb} + S_c^*Z_{xc}\}$$

$$\Im_{S^*Z} = \Im\{S_a^*Z_{xa} + S_b^*Z_{xb} + S_c^*Z_{xc}\}$$

Usando a relação trigonométrica  $cos^2\theta + sen^2\theta = 1$ :

$$\left(\frac{\Re_{S^*Z} + |V_{rx}|^2}{|V_{sx}||V_{rx}|}\right)^2 + \left(\frac{\Im_{S^*Z}}{|V_{sx}||V_{rx}|}\right)^2 = 1$$

$$\left(\Re_{S^*Z} + |V_{rx}|^2\right)^2 + \Im_{S^*Z}^2 = |V_{sx}|^2|V_{rx}|^2$$

$$\Re_{S^*Z}^2 + 2\Re_{S^*Z}|V_{rx}|^2 + |V_{rx}|^4 + \Im_{S^*Z}^2 - |V_{sx}|^2|V_{rx}|^2 = 0$$

$$|V_{rx}|^4 + (2\Re_{S^*Z} - |V_{sx}|^2)|V_{rx}|^2 + \Re_{S^*Z}^2 + \Im_{S^*Z}^2 = 0$$

Sendo:

$$\Re_{S^*Z} = (P_a R_{xa} + Q_a X_{xa}) + (P_b R_{xb} + Q_b X_{xb}) + (P_c R_{xc} + Q_c X_{xc})$$

e:

$$\Re_{S^*Z}^2 + \Im_{S^*Z}^2 = (P_a^2 + Q_a^2)*(R_{xa}^2 + X_{xa}^2) + (P_b^2 + Q_b^2)*(R_{xb}^2 + X_{xb}^2) + (P_c^2 + Q_c^2)*(R_{xc}^2 + X_{xc}^2)$$

## 5 Otimização por redução de barras

## **6 Descrição do programa desenvolvido**

## 7 Resultado das simulações

## 8 Conclusão e considerações finais



# Referências

- ANEEL. *Resolução Normativa n 649/15*. Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. 21
- ANEEL. *Tabela de Perdas de Energia Elétrica*. Brasil, 2015. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>. Acesso em 09/01/2016. 24
- BANK, T. W. *Electric power transmission and distribution losses (% of output)*. Estados Unidos: [s.n.], 2015. World Development Indicators. 22
- CESPEDES, R. New method for the analysis of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, January 1990. 7
- EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015*. Brasil, 2015. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>. Acesso em 09/01/2016. 20
- MME. *Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro*. Brasil, 2015. Disponível em: [www.mme.gov.br/documents/10584/2027273/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Setembro-2015.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/2027273/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Setembro-2015.pdf). Acesso em 08/01/2016. 19, 23
- ONS. *Dados Relevantes 2014*. Brasil, 2015. Disponível em: [www.ons.org.br/download/biblioteca\\_virtual/publicacoes/DADOS2014\\_ONS/index.html](http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS2014_ONS/index.html). Acesso em 08/01/2016. 19
- SHIRMOHARMNADI, e. a. D. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, May 1988. 7