

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

CAIO QUEIROZ DA FONSECA

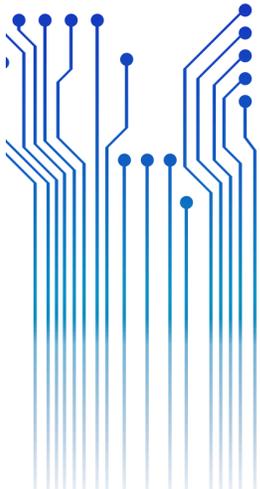


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
POWERCAS – SISTEMA DE SOFTWARE PARA O APOIO A RESOLUÇÃO
DE PROBLEMAS DE ENGENHARIA DE POTÊNCIA



Departamento de
Engenharia Elétrica



CAMPINA GRANDE – PB

2018

CAIO QUEIROZ DA FONSECA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**POWERCAS – SISTEMA DE SOFTWARE PARA O APOIO A RESOLUÇÃO
DE PROBLEMAS DE ENGENHARIA DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Freire de Souza Santos

CAMPINA GRANDE – PB

2018

CAIO QUEIROZ DA FONSECA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
POWERCAS – SISTEMA DE SOFTWARE PARA O APOIO A RESOLUÇÃO
DE PROBLEMAS DE ENGENHARIA DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Engenheiro Eletricista.

Área de concentração: Eletrotécnica

Aprovado em: ____/____/____

Prof. Danilo Freire de Souza Santos, D.Sc.

Professor Orientador

Prof. Jaidilson Jó da Silva, D.Sc.

Professor Convidado

“Este trabalho é dedicado às crianças adultas, que quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu agradeço a DEUS, por todas as vitórias e por nunca ter me desamparado e ter me trazido até aqui, pois sem Ele, eu nada teria feito e eu nada seria.

Agradeço aos meus pais Esdras e Sheila pelo apoio incomensurável. Assim como agradeço a minha esposa Bruna Karen, por ter lutado ao meu lado na universidade e por ser minha companheira de vida e que há tantos anos caminha ao meu lado para construção desse nosso sonho.

Agradeço também a toda família, que ofereceu todo o apoio e carinho para que eu continuasse nessa jornada.

Agradeço ao Professor Danilo Freire por ter sido meu orientador neste trabalho, por sua flexibilidade e compreensão, e por ter compartilhado dos seus conhecimentos durante esse período.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte dessa caminhada de aprendizado.

Agradeço a todos os funcionários do DEE, em especial a Adail e Tchaikovsky que sempre ajudaram imensamente do início ao fim do curso.

*“Talvez seja verdade que aquele que viaja
mais rápido, viaja sozinho, mas aquele que
viaja mais longe, viaja com outros.”*

RESUMO

Duas áreas que avançam rapidamente, são as áreas de desenvolvimento de softwares e a área de energia, tais áreas demandam contínua pesquisa e desenvolvimento, já que se falando de energia, o desenvolvimento econômico de um país está diretamente ligado com o consumo energético deste país, o que implica dizer que os sistemas elétricos devem estar preparados para o contínuo avanço. Na área do desenvolvimento de softwares, o comportamento é bem similar, pois o mundo hoje, está cada vez mais dependente de ferramentas e programas computacionais que possam gerenciar e controlar de forma incessante e mecânica, auxiliando os seres humanos, em tarefas das mais variadas, estando presentes em hospitais, empresas, indústrias e não poderia ser diferente no setor energético.

Estas duas áreas estão conectadas, pois como mencionado, o software fornece um auxílio de essencial importância para o ser humano, para que o mesmo possa gerenciar e controlar o sistema elétrico. Além disso, estudos e simulações e até calcular parâmetros para poder projetar o sistema e resolver problemas importantes do sistema elétrico que sem os computadores seria uma tarefa que exigiria um esforço grande e desnecessário com a tecnologia atual presente.

Este trabalho, visa justamente desenvolver um software que tem como objetivo auxiliar engenheiros e alunos de engenharia elétrica, no estudo, simulações e resolução de alguns problemas bastante importantes na área de engenharia de potência.

Palavras-chaves: Desenvolvimento de Software, Sistema Elétrico, Engenharia de Potência

ABSTRACT

There are two fields, that rapidly advances, which are software development and the energy sector, these areas require continuous research and development, because speaking of energy, the economic development of a country is directly connected to the energy consumption of the country, which means that the electric system has to be prepared to the continuous advances. In the software development area, the behavior is quite similar, because the world today, is becoming more and more dependent on the computational programs and tools that can manage and control in a mechanic and continuous manner, assisting human beings, in any sorts of tasks, present in hospitals, companies, industries and it would not be any different in the energy sector.

These two fields, are connected, because as mentioned, softwares can provide an assistance that is very important to human beings, so that humans can manage and control the electric system, or study and make simulations or calculate parameters in order to design the system and resolve important problems to the electric system that without computers it would be a highly demanding and unnecessary task having the current technology in hands.

This project, aims to develop a software that has the objective to assist engineers and electrical engineering students in the study, simulations and in the solutions of some of the important problems in the field of power engineering.

Key-words: Software Development, Electric System, Power Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem do Site da Plataforma Anaconda.....	20
Figura 2 - Escolha do Arquivo de acordo com Sistema do Usuário.....	21
Figura 3 - Instalação da Plataforma Anaconda.....	21
Figura 4 - Spyder.....	22
Figura 5 - Pontos Internos.....	23
Figura 6 - Linhas Perfeitamente Transpostas.....	25
Figura 7 - Três Condutores.....	26
Figura 8 - Efeito do Plano Terra.....	28
Figura 9 - Circuito π -Nominal.....	32
Figura 10 - Parâmetros ABCD.....	32
Figura 11 - Alimentador Referente ao Exemplo sobre Alocação de Banco de Capacitores.....	36
Figura 12 - Modelo de Regressão SVR – Variação dos Parâmetros C e Gamma.....	44
Figura 13 – Diagrama da Análise Hierárquica de Tarefas do PowerCAS.....	45
Figura 14 - Captura de tela da Interface Gráfica Inicial do PowerCAS.....	45
Figura 15 - Selecionando a Janela de Parâmetros de Linhas de Transmissão.....	46
Figura 16 - Diagrama AHT da Função Parâmetros de Linhas de Transmissão.....	46
Figura 17 - Interface Inicial da Aplicação Parâmetros de Linhas de Transmissão.....	47
Figura 18 - Selecionando a Opção de Dois Condutores por fase.....	47
Figura 19 - Dados Preenchidos e Resultado Fornecido de Reatância e Capacitância por km.....	48
Figura 20 - Selecionando a Opção “Efeito Ferranti”.....	48
Figura 21 - Interface Inicial - Efeito Ferranti.....	49
Figura 22 - Diagrama AHT da Função “Efeito Ferranti”.....	49
Figura 23 - Dados do Exemplo Preenchidos e Resultado Obtido – Efeito Ferranti.....	50
Figura 24 - Selecionando a Opção Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores.....	50
Figura 25 - Interface Inicial da Aplicação Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores.....	51
Figura 26 - Diagrama AHT da Função Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores.....	51

Figura 27 - Dados do Exemplo Preenchidos e Resultado Obtido – Alocação Ótima de Banco de Capacitores.....	52
Figure 28 - Dados Preenchidos e Resultado Obtido – Alocação Ótima de Banco de Capacitores.....	53
Figura 29 - Selecionando a Aplicação Previsão de Carga.....	54
Figura 30 - Interface Inicial da Aplicação Previsão de Carga.....	54
Figura 31 - Diagrama AHT da Aplicação Previsão de Carga.....	55
Figura 32 - Preenchimento dos Dados para a Função $x^3 - 4x^2 + x + 3$	56
Figura 33 - Previsão de Carga – Regressão Polinomial.....	57
Figura 34 - Previsão de Carga - SVR.....	57
Figura 35 - Dados Preenchidos dos Valores de Consumo de Energia Elétrica.....	58
Figura 36 - Modelo de Regressão Polinomial com grau 3.....	59
Figura 37 - Modelo de Regressão Polinomial com grau 10.....	60
Figura 38 - Modelo de Regressão SVR com $C = 10000$ e $\text{Gamma} = 0,1$	61
Figura 39 - Modelo de Regressão SVR com $C = 100$ e $\text{Gamma} = 10$	61
Figura 40 - Resultado da Previsão para 5 dados à Frente – Regressão Polinomial com grau 3.....	62
Figura 41 - Resultado da Previsão para 5 dados à Frente – Regressão SVR – $C = 10000$ e $\text{Gamma} = 0,1$	63
Figura 42- Resultado da Previsão para 5 dados à Frente – Regressão SVR – $C = 10$ e $\text{Gamma} = 10$	63
Figura 43 - Dados Plotados sem Previsão de Carga.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de Energia Elétrica em kWh para cada mês.	58
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHT	Análise Hierárquica de Tarefas
DMG	Distância Média Geométrica
kV	kilo-Volts
MVA	Mega Volt-Ampère
Mvar	Mega Volt-Ampère Reativo
Pu	Sistema Por Unidade
RMG	Raio Médio Geométrico
SVM	<i>Support Vector Machine</i> ou Máquina de Vetores de Suporte
SVR	<i>Support Vector Regression</i> ou Máquina de Vetores de Regressão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	15
1.2. MOTIVAÇÃO	15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA.....	17
2.1. ESCOLHA DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO - PYTHON.....	17
2.2. TKINTER	19
2.3. INSTALANDO ANACONDA – SPYDER.....	19
2.4. PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	22
2.5. EFEITO FERRANTI	31
2.6. ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM ALIMENTADORES	34
2.7. PREVISÃO DE CARGA.....	40
2.7.1 REGRESSÃO POLINOMIAL	41
2.7.2 REGRESSÃO VETORES DE SUPORTE DE REGRESSÃO (SVR)	42
3. POWERCAS	44
3.1. PANORAMA GERAL	44
3.2. ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS – PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO..	46
3.3. ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS – EFEITO FERRANTI.....	48
3.4. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM ALIMENTADORES	50
3.5. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PREVISÃO DE CARGA	53
4. CONCLUSÕES.....	65
5. REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais quando se fala em engenharia elétrica, não se tem um consenso dos limites de onde começa e onde termina sua atuação. O que antigamente poderia ser explicado apenas como fornecer energia elétrica para consumidores, hoje, não há fronteiras para a profissão e suas aplicações, seja de fato fornecendo energia de forma mais eficiente e inteligente para consumidores, ou na eletrônica presente nos celulares e computadores, em satélites, no controle e na automação de robôs industriais ou até mesmo com aplicações na medicina e neurociência.

Pode-se facilmente afirmar que o campo de atuação é bastante amplo, indo fundamentalmente desde eletromagnetismo de alta frequência nos casos de rádio e Internet, robótica, computação, controle e automação, etc. Até o eletromagnetismo de baixa frequência como no caso da engenharia de sistemas elétricos, entre diversos outros. Cada área do mercado precisa de profissionais cada vez mais especializados em um determinado setor, tais profissionais precisam ser interdisciplinares, utilizando fundamentos bem estabelecidos em todas as áreas que formariam o núcleo da engenharia elétrica, aqueles conhecimentos e habilidades essenciais para qualquer engenheiro eletricitista possuir, tais como eletrônica, circuitos elétricos, eletromagnetismo, sistemas elétricos, controle e automação, etc.

A área de engenharia de sistemas elétricos de potência possui diversos problemas a serem resolvidos durante a execução de projetos, problemas que são complexos ou até mesmo ineficientes de serem resolvidos sem o auxílio de uma ferramenta computacional. Problemas como a previsão de carga, os parâmetros de linhas de transmissão, o efeito Ferranti, alocação do banco de capacitores em um alimentador, faltas em sistemas elétricos, etc. Sendo assim um software para resolução desses tipos de problemas pode se tornar um grande aliado para os engenheiros e estudantes de engenharia em seu dia a dia.

Esse trabalho propõe o desenvolvimento de um software que tem como objetivo solucionar alguns dos problemas encontrados na área de engenharia de potência, com foco em oferecer uma interface de fácil uso para o usuário que permita executar soluções rápidas para tais problemas.

1.1. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a especificação, desenvolvimento e validação de um software para a resolução de problemas numéricos de engenharia de potência, desde parâmetros de linhas de transmissão [3], efeitos Ferranti [1], até previsão de carga [2] em um sistema de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de aprendizado de máquina, entre outros.

Existem softwares, tais como o PowerWorld¹, na área de sistemas elétricos por exemplo, que auxiliam engenheiros desta área, porém são bastante específicos se propondo a resolver um único problema da área. O diferencial do software proposto neste trabalho, é a resolução rápida e prática de diversos problemas encontrados em campo ou em projetos, podendo ser usados por engenheiros ou por estudantes de engenharia elétrica que busquem auxílio em seus estudos e projetos.

Portanto, tem-se como objetivo desenvolver um software com uma interface gráfica de fácil uso, com diversas funcionalidades que se propõe a resolver os problemas supracitados, entre outros problemas. Também faz parte do objetivo deste trabalho, realizar o estudo e avaliação de softwares similares, avaliando seu uso com foco centrado no usuário, de modo a realizar o levantamento e especificação de requisitos. Após esse levantamento de requisitos, pretende-se desenvolver o projeto baseado em conceitos de engenharia de software e engenharia de requisitos. Por fim, também pretende-se implementar algoritmos de aprendizado de máquina e algoritmos criados para este projeto.

1.2. MOTIVAÇÃO

A motivação para este trabalho se encontra na indisponibilidade de ferramentas computacionais gratuitas, de fácil acesso e com qualidade para solução de problemas, tanto para alunos do curso de engenharia elétrica, como para profissionais da área. Este projeto deseja solucionar essa falta da área, promovendo um software de interface intuitiva com o usuário, permitindo a resolução de problemas relevantes de engenharia elétrica de forma rápida e acessível tanto para estudantes como profissionais.

¹ Fonte: www.powerworld.com

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão apresenta a seguinte estrutura:

Na seção 2 apresenta-se a fundamentação teórica para as funções presentes no programa que são relacionadas com a área de análise de sistemas elétricos e distribuição de energia elétrica, apresentando suas características, seus algoritmos e exemplos para uma melhor compreensão. Apresenta também a motivação para a escolha da linguagem de programação para o desenvolvimento do software assim como a biblioteca usada para o desenvolvimento da interface gráfica, e prepara o usuário para a instalação correta para a execução do programa.

Na seção 3 descreve-se o software, apresentando desde sua interface inicial, assim como todas as suas funcionalidades, demonstrando de fato seu funcionamento.

Na seção 4 é apresentada a conclusão do trabalho, destacando o aprendizado e as partes mais importantes do presente trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLÓGICA

Esta seção apresenta toda a fundamentação teórica necessária para desenvolver as soluções dos problemas propostos neste trabalho na área de engenharia de potência, demonstrando os algoritmos que são utilizados para resolução dos mesmos. Além disto, também é apresentada a fundamentação tecnológica que se baseia este trabalho, destacando a linguagem de programação escolhida, e qual a motivação para tal escolha, tendo em vista a quantidade de linguagens de programação que existem hoje em dia, e também qual a plataforma foi utilizada para o desenvolvimento da interface gráfica deste projeto.

2.1. ESCOLHA DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO - PYTHON

O desenvolvimento de software, hoje, é algo que pode ser encontrado nas mais diversas indústrias, nas ciências e mais variadas áreas do conhecimento. Softwares são desenvolvidos para auxiliar os caixas dos supermercados, para monitoramento e segurança de empresas, estão presentes no controle dos carros autônomos (*self-driving cars*), até para levar o homem à lua ou levar sondas à Marte. Não existem limites para o que se pode fazer com o desenvolvimento de softwares, devido à este fato, diversas linguagens de programação foram criadas para que se pudesse ter uma atualização das que já eram presentes no mercado, ou ainda, para que se pudesse desenvolver aplicações específicas e assim, com determinada linguagem, tal desenvolvimento seria mais intuitivo e mais apropriado para o que se deseja desenvolver.

Há algum tempo, ou nas gerações anteriores de desenvolvedores e cientistas da computação, havia a necessidade de realmente ter conhecimento de várias linguagens de programação e realmente dominá-las completamente. Hoje, em contrapartida, não se faz tão necessário o domínio por completo de determinadas linguagens de programação, como mencionado, existe um número cada vez mais crescente de linguagens e que possuem aplicações mais adequadas para serem desenvolvidas, de forma que, engenheiros, desenvolvedores e cientistas da computação necessitam apenas, possuírem domínio sobre os fundamentos da programação, escolhendo a linguagem de programação que melhor se adequa para determinada aplicação.

Para citar algumas linguagens e aplicações, temos para o desenvolvimento web as linguagens Javascript ou C#. Para programação de microcontroladores ou de sistemas embarcados, a linguagem mais adequada é a C. Para aplicações que necessitam de uma linguagem mais funcional e matemática tem a Haskell. Já para resolução de problemas numéricos podem ser escolhidas as linguagens Fortran, o MATLAB, ou a linguagem Python.

Este tópico apresenta as razões para a escolha da linguagem Python² para o desenvolvimento do software deste trabalho. A linguagem Python é uma linguagem de alto nível, o que significa dizer, que é mais intuitiva para nós seres humanos, pois é uma linguagem mais próxima a nossa linguagem e mais distante da linguagem de máquina, como seria uma linguagem *assembly* por exemplo. A princípio, iria ser escolhido outro software para desenvolvimento da interface gráfica, porém, devido às características do Python, unido ao fato de que é mais versátil e por apresentar uma maior liberdade para desenvolver a interface e o software como um todo da forma que se desejar, fez com que a escolha ficasse mais fácil.

A linguagem Python, é uma linguagem atualmente muito utilizada e difundida mundialmente, e com uma comunidade bastante presente em congressos, maratonas de programação ou até mesmo online. É uma linguagem bastante adequada para a ciência dos dados, inteligência artificial e/ou *machine learning* e para o desenvolvimento de interfaces gráficas. Pode-se citar também as principais características que tornam dessa linguagem muito adequada para uma gama de aplicações[5][6]:

- Operações e tipos de dados de alto nível;
- Modelo orientado à objetos;
- Documentação excelente;
- Um sistema de prototipagem ideal;
- Portabilidade através de arquiteturas;
- Ampla gama de extensões suportadas;
- Facilidade em “migrar” para C e C++ em aplicações embarcadas.

² Fonte: www.python.com

2.2. TKINTER

É de fundamental importância falar sobre o Tkinter³ neste trabalho, pois toda a interface gráfica foi desenvolvida através dele. Assim como a escolha do Python mencionada acima, a escolha do Tkinter foi semelhante, visto que, existem diversas plataformas e formas de se desenvolver interfaces gráficas, inclusive utilizando a linguagem Python para este propósito, porém de forma análoga, foi escolhido utilizar o Tkinter pela versatilidade, e liberdade em poder criar uma interface intuitiva e da forma como o desenvolvedor desejar. O Tkinter é um módulo da linguagem Python, que fornece aos desenvolvedores, diversas ferramentas para uma criação de interfaces intuitivas, e com apenas algumas poucas linhas de código já é possível a criação de janelas com textos e botões para diversas aplicações. Falando da performance da linguagem Python/Tkinter deve-se analisar que a linguagem Python é interpretada, e ao se usar o módulo Tkinter, o mesmo irá chamar bibliotecas (Tcl e Tk) para serem interpretadas também, de forma que para análises e aplicações em tempo real, a combinação Python/Tkinter pode não ser a escolha mais adequada, porém para a maioria das aplicações que não envolvem tais análises e as que não tenham foco em performance, a combinação Python/Tkinter para aplicações com interfaces gráficas, principalmente em computadores modernos, apresentam uma ótima performance.

2.3. INSTALANDO ANACONDA – SPYDER

A linguagem Python, como mencionado anteriormente, é uma linguagem interpretada, e existem inúmeras maneiras de interpretar um código escrito em Python. Pode-se até mesmo programar em Python no próprio terminal ou no *prompt* de comando. A escolha pela plataforma Anaconda, se dá pelo fato desta plataforma já apresentar todas as ferramentas necessárias para se trabalhar com a linguagem Python, sem que seja necessário fazer nenhuma instalação externa. As bibliotecas essenciais para o software como *numpy*⁴, *pandas*⁵, e *matplotlib*⁶, já vem instaladas com a plataforma.

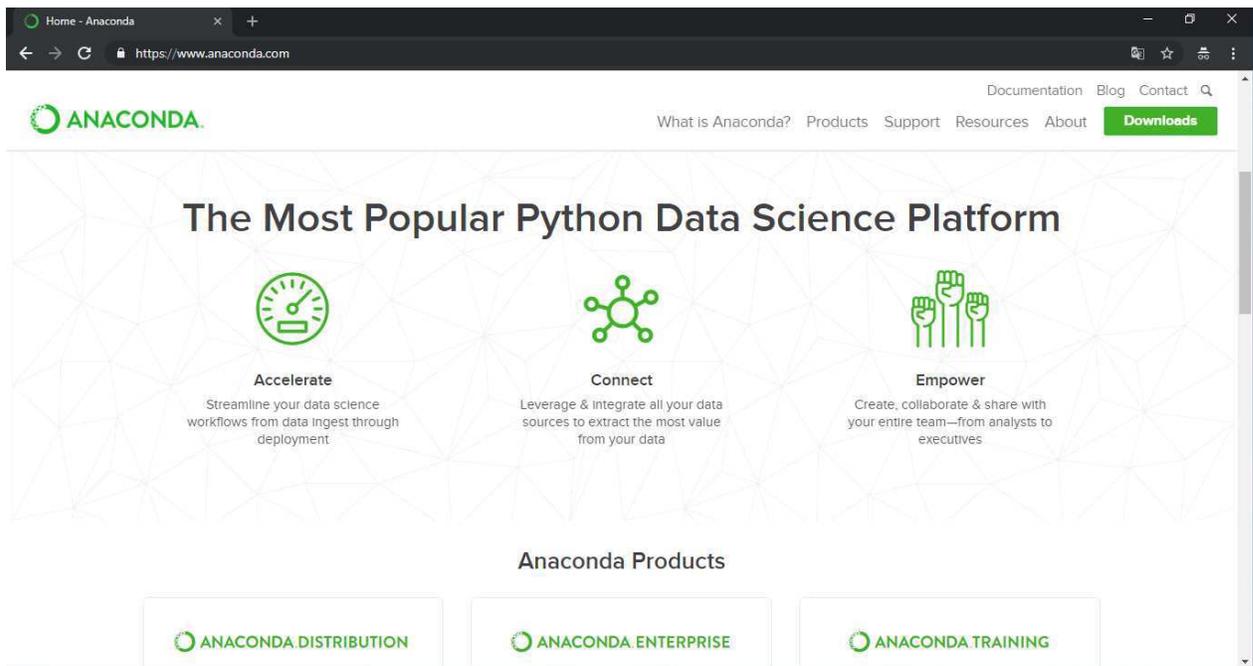
³ Fonte: [5]

⁴ www.numpy.org

⁵ www.pandas.pydata.org

A plataforma é gratuita e a instalação é simples. Basta visitar o site da plataforma www.anaconda.com fazer o *download* para o sistema do usuário, e seguir com a instalação como segue abaixo. Pode-se visualizar na Figura 1 a imagem do site da plataforma Anaconda, já na Figura 2 pode ser visualizado os tipos de arquivo para o *download* de acordo com o sistema operacional utilizado e a janela de instalação do programa conforme a Figura 3.

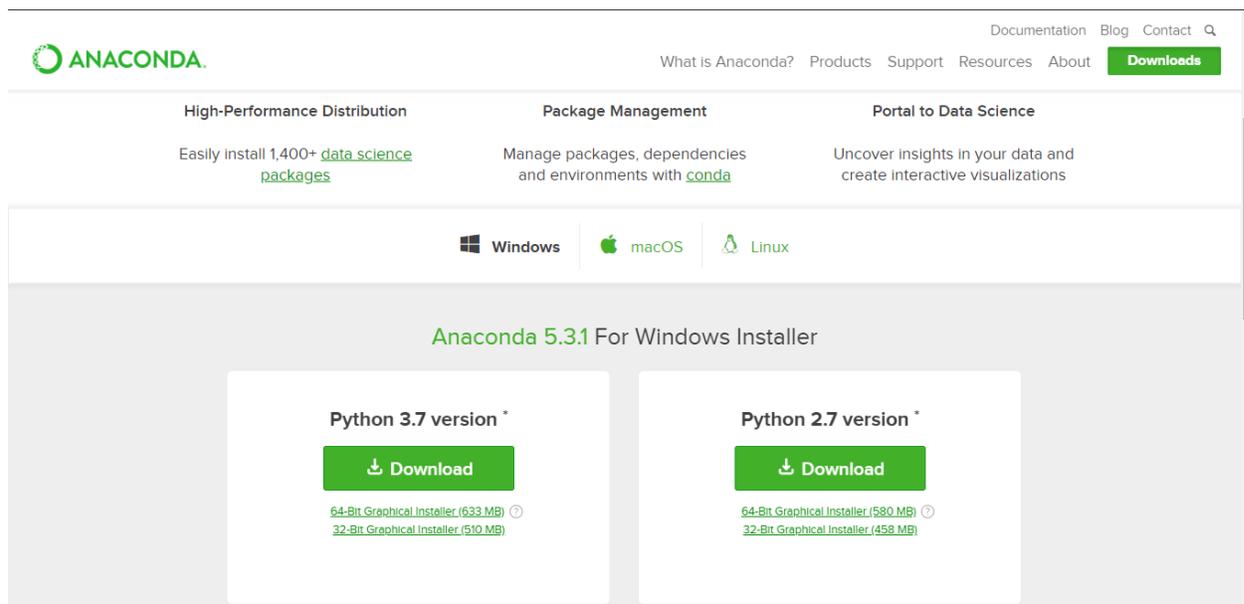
Figura 1 – Imagem do Site da Plataforma Anaconda.



Fonte: www.anaconda.com

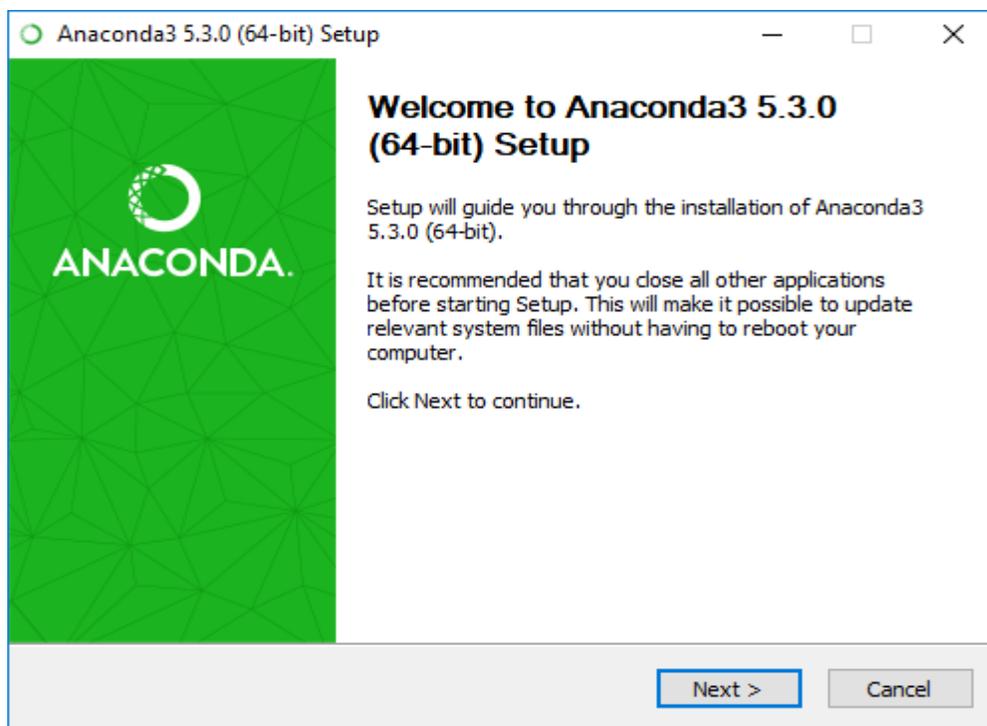
⁶ www.matplotlib.org

Figura 2 - Escolha do Arquivo de acordo com Sistema do Usuário.



Fonte: www.anaconda.com

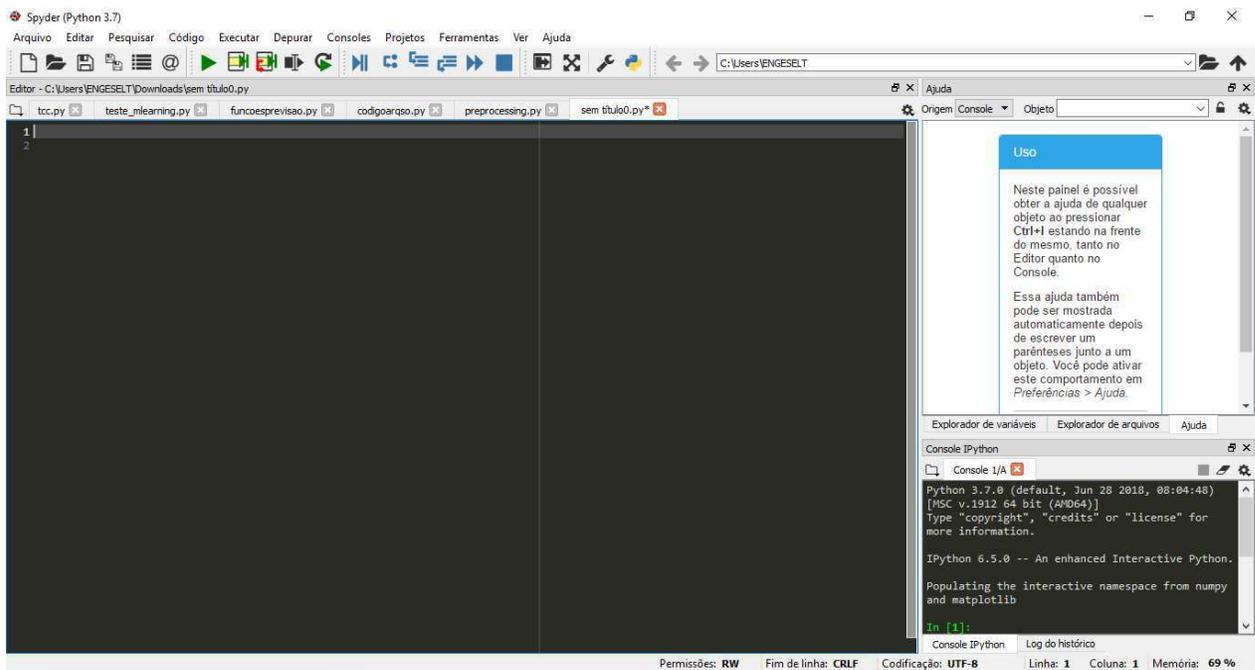
Figura 3 - Instalação da Plataforma Anaconda.



Fonte: www.anaconda.com

Após concluída a instalação, haverá diversos programas que a plataforma oferece para desenvolvimento em Python. O programa utilizado para criação desse software, é o Spyder, programa este utilizado amplamente, e desenvolvido especialmente para uma programação de ciência dos dados ou programação científica. Na Figura 4 pode ser visualizado a plataforma Spyder.

Figura 4 - Spyder.



Fonte: Próprio Autor.

2.4. PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Com o desenvolvimento econômico e demográfico de uma região, é previsto que haverá um maior consumo de energia elétrica por parte deste mesmo local[9]. Ao se projetar linhas de transmissão, deve-se sempre levar em consideração tais fatores, como a perspectiva de expansão da capacidade e do consumo da região que irá receber essa energia.

Uma das alternativas para aumentar a capacidade de transmissão de potência através das linhas de transmissão, é aumentar o número de condutores por fase, o que acarretará em uma diminuição da reatância total da linha, aumentando assim a capacidade de transmissão. Isso pode ser observado da seguinte forma:

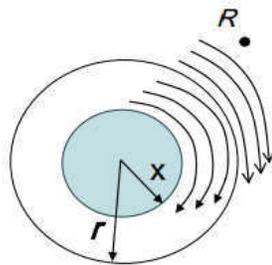
- Procedimentos para o cálculo da indutância de um condutor infinito:
 - Cálculo da Intensidade do Fluxo Magnético (H);
 - Cálculo da Densidade de Fluxo ($B=\mu H$);
 - Fluxo Concatenado;
 - Cálculo da Indutância ($L = \lambda/I$).

- A partir da Lei de Ampère, tem-se:

$$\int_0^{2.\pi.x} H . dl = I \quad (1)$$

- Para pontos internos em que $x < r$, na Figura 5 pode ser visto um exemplo para cálculo da intensidade de fluxo magnético para pontos em que x é menor que o raio r :

Figura 5 - Pontos Internos.



Fonte: [3]

- Considerando distribuição uniforme de corrente:

$$\frac{I}{\pi.r^2} = \frac{I_x}{\pi.x^2} \rightarrow H_x = \frac{I}{2.\pi.r^2} x \rightarrow B_x = \frac{\mu_0 I}{2.\pi.r^2} x \text{ (Wb/m}^2\text{)} \quad (2)$$

- Fluxo diferencial por unidade de comprimento:

$$d\phi_x = B_x dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x dx \quad (3)$$

- Fluxo concatenado (λ):

$$d\lambda_x = \frac{x^2}{r^2} d\phi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad (4)$$

- Fluxo interno:

$$\lambda_{int} = \int_0^r d\lambda_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \quad (5)$$

- Para pontos externos em que $x > r$:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (6)$$

Como o ponto é externo, todo o fluxo estará associado à corrente total I no interior do condutor, portanto:

- Fluxo diferencial por unidade de comprimento:

$$d\phi_x = B_x dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad (7)$$

- Fluxo concatenado (λ):

$$d\lambda_x = d\phi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad (8)$$

- Fluxo interno:

$$\lambda_{int} = \int_0^r d\lambda_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \quad (9)$$

Logo, tendo como limites o raio do condutor (D1) e a distância geométrica (D2):

$$\lambda_{ext} = \int_{D_1}^{D_2} d\lambda_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{D_1}^{D_2} \frac{1}{x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} \rightarrow L_{ext} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (10)$$

$$D_2 = R \quad (11)$$

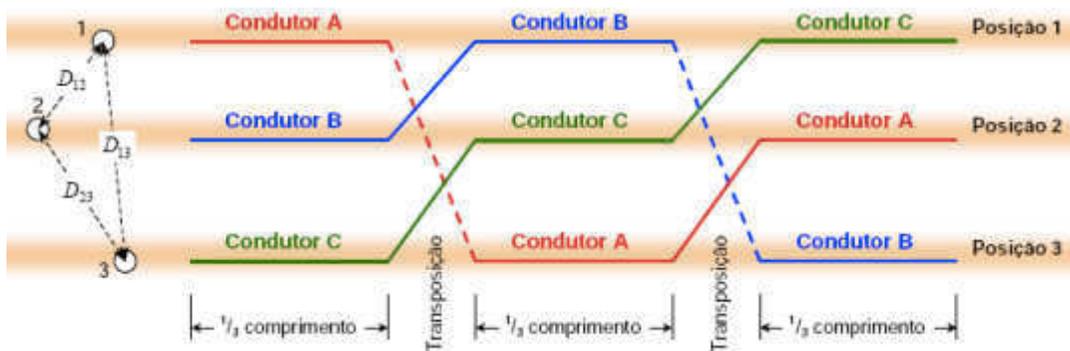
$$D_1 = r \quad (12)$$

Sendo assim, pode-se calcular o fluxo total:

$$\lambda_{total} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{R}{r} \right) \rightarrow L = \frac{\lambda_{total}}{I} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln \frac{R}{r e^{-1/4}} \right) H/m \quad (13)$$

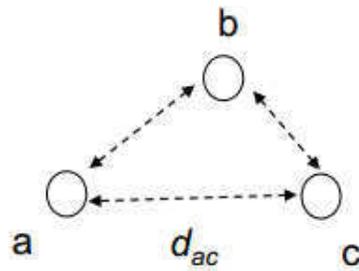
Na Figura 6 podem ser visualizadas linhas perfeitamente transpostas, indicando que as capacitâncias parasitas entre cada condutor e a terra e entre os condutores estão em equilíbrio. Já na Figura 7 é apresentada a representação dos três condutores por fase. Assim, admitindo linhas perfeitamente transpostas, tem-se:

Figura 6 - Linhas Perfeitamente Transpostas.



Fonte: [3]

Figura 7 - Três Condutores.



Fonte: [3]

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (14)$$

$$L = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln \frac{DMG}{R_s} \right) \quad (15)$$

$$DMG = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}} \quad (16)$$

$$R_s = r e^{-1/4} \quad (17)$$

Onde:

- DMG é a distância média geométrica entre condutores;
- R_s – RMG é o raio médio geométrico que pode ser definido como o raio de um condutor fictício de espessura infinitesimal que produziria a mesma indutância que o condutor real.

Encontrando a indutância L , pode-se então encontrar a reatância X como se segue:

$$X = \omega L = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{DMG}{R_s} \right) \Omega \quad (18)$$

Para cálculos com mais de um condutor por fase, o RMG é calculado da seguinte forma:

- Dois condutores por fase: $RMG = \sqrt[4]{(R_s \times d)^2}$
- Três condutores por fase: $RMG = \sqrt[9]{(R_s \times d \times d)^3}$
- Quatro condutores por fase: $RMG = \sqrt[16]{(R_s \times d \times d \times d \times \sqrt{2})^4}$

- O cálculo da capacitância será feito da seguinte forma:

A capacitância pode ser obtida através da utilização da lei de Gauss determinando o potencial elétrico produzido por uma carga colocada no condutor.

$$\oint D \cdot ds = Q_{envolvida} \quad (\text{Lei de Gauss}) \quad (19)$$

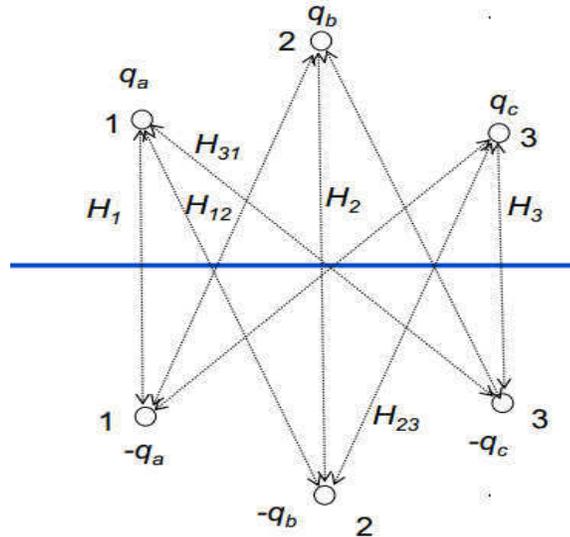
- De acordo com a Figura 7:

$$q_a + q_b + q_c = 0 \quad (20)$$

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{DMG}{RMG}} \text{ F} \quad (21)$$

- De onde DMG e RMG são calculados da mesma forma que foi demonstrada anteriormente para o cálculo da indutância com mais de um condutor.
- Deve-se levar em consideração outra opção de cálculo que considera também o efeito do plano terra para o aumento da capacitância dos condutores conforme pode ser visualizado na Figura 8 os três condutores por fase assim como os condutores refletidos pelo efeito terra:

Figura 8 - Efeito do Plano Terra.



Fonte: [3]

- Neste caso a fórmula da capacitância será (Método das imagens):

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{DMG}{RMG} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}} \right)} F \quad (22)$$

- Onde H representa a altura, H_{12} representa a altura entre o condutor 1 até o condutor 2 refletido na terra, e assim por diante, como pode ser visto na Figura 8.

Abaixo seguem dois exemplos, onde será observado que, aumentando o número de condutores por fase, a reatância da linha será diminuída.

- EXEMPLO 1 (Fonte: [3]): Uma linha trifásica perfeitamente transposta, operando em 60 Hz, tem um condutor/fase todos no mesmo plano horizontal. O espaçamento entre condutores adjacentes é de 10 metros e os condutores utilizados são ACSR 1590 MCM (Falcon) ($RMG = R_s = 0,0158m$). Determine a reatância/km da linha.

- Solução: Utilizando das equações demonstradas acima, tem-se

$$DMG = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}} = \sqrt[3]{10 \times 10 \times 20} = 12,5992m$$

$$X = \omega \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{DMG}{R_s} \right)$$

$$X = 1000 \times 377 \times \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{12,5992}{0,0158} \right) \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,5038 \Omega/\text{km}$$

- EXEMPLO 2 (Fonte: [3]): Repetir o exemplo 1 substituindo cada condutor fase por dois condutores de (RMG = $R_s = 0,0079\text{m}$). O espaçamento entre condutores de mesma fase é 0,40m. Determine a reatância/km da linha.

Solução: O cálculo é realizado da mesma forma que no exemplo anterior, porém o RMG neste exemplo irá mudar, pois agora terá dois condutores por fase. Tem-se que:

$$\text{RMG} = \sqrt[4]{(R_s \times d)^2} = \sqrt[4]{0,0079 \times 0,4)^2} = 0,0563 \text{ m}$$

Utilizando a mesma fórmula para a reatância, tem-se:

$$X = \omega \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{DMG}{RMG} \right)$$

$$X = 1000 \times 377 \times \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{12,5992}{0,0563} \right) \Omega/\text{km}$$

$$X = 0,4080 \Omega/\text{km}$$

Pode-se perceber que aumentando apenas um condutor por fase, tendo dois condutores por fase, resultará em uma diminuição significativa da reatância da linha.

Considerando os mesmos exemplos para calcular a capacitância, e a altura dos condutores ao solo de 20 metros, tem-se:

- Desprezando efeito plano terra:

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{DMG}{RMG}}$$

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{12,5992}{0,0079}} = 7,54 \text{ pF}$$

- Para dois condutores:

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{12,5992}{0,0563}} = 10,28 \text{ pF}$$

- Considerando efeito plano terra, altura de 20 metros:

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{DMG}{RMG} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}} \right)}$$

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{12,5992}{0,0079} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{41,23 \times 41,23 \times 44,72}}{\sqrt[3]{20 \times 20 \times 20}} \right)} = 8,39 \text{ pF}$$

- Considerando efeito plano terra, altura de 20 metros, com dois condutores por fase:

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{DMG}{RMG} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}} \right)}$$

$$C_{pos} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{12,5992}{0,0563} - \ln \left(\frac{\sqrt[3]{41,23 \times 41,23 \times 44,72}}{\sqrt[3]{20 \times 20 \times 20}} \right)} = 11,93 \text{ pF}$$

2.5. EFEITO FERRANTI

O efeito Ferranti [1] é um problema bastante recorrente na área de engenharia de potência, e pode ser descrito como uma sobretensão sustentada que ocorre devido à capacitância em derivação (*shunt*) distribuída das linhas de transmissão, ou ainda, as capacitâncias parasitas ao longo das linhas de transmissão. Quando há ausência de carga, ou seja, quando a linha está operando em vazio, há uma elevação da tensão, principalmente no receptor em aberto, o que acaba exigindo um esforço excessivo nos isolamentos. Este efeito ocorre de forma ainda mais agravada quando o comprimento da linha aumenta, para linhas mais curtas que 80 km, este efeito pode ser relevado para algumas situações e as resistências e reatâncias podem ser consideradas como elementos concentrados, porém para linhas mais extensas que 80 km principalmente, este efeito deve ser considerado, pois a tensão começa a aumentar de forma bastante significativa conforme a linha aumenta. Pode-se ainda destacar, que, este efeito será mais intenso, para situações em que os cabos são isolados (linhas subterrâneas ou submarinas), ainda que a linha tenha o mesmo comprimento e tensão nominal que as linhas aéreas, isso ocorre pelo fato de nestes casos, tal linha teria uma maior capacitância *shunt*[3].

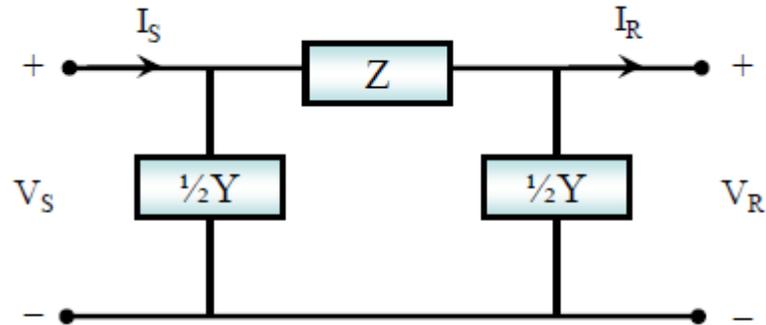
As sobretensões sustentadas, também chamadas de temporárias, apresentam duração de vários ciclos ou podem chegar a vários segundos, e os valores de pico chegam a um máximo de 1,5 pu. As causas mais frequentes para estas sobretensões, além do efeito Ferranti, são:

- Faltas fase-terra em sistemas trifásicos;
- Ressonância linear;
- Ferroressonância;
- Perda súbita de carga em geradores.

Uma forma de solucionar o problema do efeito Ferranti é inserir um reator no terminal do receptor em aberto, para compensação dos reativos que foram injetados na linha pelas capacitâncias parasitas da linha. Esta seção apresentará os cálculos para determinar a sobretensão no terminal receptor devido ao efeito Ferranti, e os cálculos após a inserção de um reator neste mesmo terminal.

- O circuito referente à linha de transmissão, para linhas mais extensas que 80 km, será o circuito π -nominal, conforme a Figura 9.

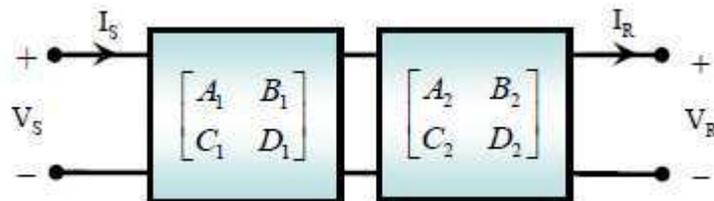
Figura 9 - Circuito π -Nominal.



Fonte: [3]

- Sendo assim, uma das formas de análise deste circuito é através dos parâmetros ABCD, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Parâmetros ABCD.



Fonte: [3]

- É fácil colocar elementos em cascata, através de forma matricial;
 - São utilizados para circuitos lineares, passivos e bilaterais de 2 portas;
 - Os parâmetros A, B, C e D dependem dos parâmetros da linha.
- As fórmulas para a tensão e corrente, de acordo com os parâmetros ABCD são as seguintes:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (23)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (24)$$

- Aplicando as Leis de Kirchhoff para o circuito da Figura 9, tem-se:

$$V_S = V_R + Z \left(I_R + \frac{YV_R}{2} \right) \rightarrow V_S = V_R \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) + ZI_R \quad (25)$$

$$I_S = \frac{YV_S}{2} + \frac{YV_R}{2} + I_R \rightarrow I_S = \left(Y + \frac{Y^2Z}{2} \right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (26)$$

- Comparando as equações de Kirchhoff acima, com as dos parâmetros ABCD, tem-se:

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} = 1 + \frac{YZ}{2}; \quad \mathbf{B} = Z; \quad \mathbf{C} = Y \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) \quad (27)$$

- Portanto, a partir destas conclusões, já é possível calcular a tensão no receptor (V_R), bastando apenas os parâmetros da linha de transmissão.

EXEMPLO (Fonte: [3]): Uma linha de transmissão de 345 kV tem $Z_{pos} = 0,0372 + j0,3604 \Omega/\text{km}$, $y_{pos} = 0,0372 + j0,3604 \text{ S/km}$ e comprimento $l = 355 \text{ km}$. Calcule:

- Parâmetros ABCD, assumindo o modelo de circuito π -nominal:
- Tensão no terminal receptor em aberto quando o emissor tiver 345 kV:
- Inserir um reator de 50 Mvar no terminal receptor e determinar a tensão no terminal receptor sem carga conectada a ele.

Solução:

$$\text{a) } Z = Z_{pos} \cdot 355 = 13,2 + j128 \Omega; \quad Y = y_{pos} \cdot 355 = j1,64 \times 10^{-3} \text{ S}$$

$$A = D = 1 + \frac{YZ}{2} = 0,89511e^{j0,69}, \quad B = Z = 128,68e^{j84,11} \Omega$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) = 1,554 \times 10^{-3} e^{j90,33} \text{ S}$$

b) $V_S = AV_R + BI_R$; $I_R = 0$ (Terminal do receptor em aberto)

$$V_R = \frac{V_S}{A} = \frac{345/\sqrt{3}}{0,89511e^{j0,69}} = 222,5e^{-j0,69} \text{ kV}$$

$$|V_{RLL}| = 385,4 \text{ kV (Tensão de linha final; 12% acima da nominal)}$$

c) Para esta situação os parâmetros ABCD são:

$$A = D = 1; \quad B = 0; \quad C = Y_{reator}$$

$$Y_{reator} = -j\frac{Q}{V^2} = -j\frac{50 \times 10^6}{345^2 \times 10^6} = -j0,00042 \text{ S}$$

Portanto, tem-se:

$$ABCD_{Total} = \begin{bmatrix} 0,89511e^{j0,69} & 128,68e^{j84,11} \\ 1,554 \times 10^{-3}e^{j90,33} & 0,89511e^{j0,69} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0,00042e^{-j90} & 1 \end{bmatrix}$$

$$ABCD_{Total} = \begin{bmatrix} 0,9488e^{j0,32} & 128,68e^{j84,11} \\ 1,178 \times 10^{-3}e^{j90,21} & 0,89511e^{j0,69} \end{bmatrix}$$

Resultando em:

$$V_R = \frac{V_S}{A} = \frac{345/\sqrt{3}}{0,9488e^{j0,32}} = 209,93e^{-j0,32} \text{ kV}$$

$$|V_{RLL}| = 363,6 \text{ kV (Tensão de linha final; 5,4% acima da nominal).}$$

2.6. ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM ALIMENTADORES

Um dos maiores problemas da engenharia de potência, é lidar com as perdas que ocorrem na transmissão e na distribuição de energia elétrica. Devido à este problema, existem diversos estudos realizados e técnicas utilizadas para que se possa aumentar a eficiência no transporte de energia elétrica e consequentemente a redução de perdas no sistema elétrico[10].

Para reduzir perdas na distribuição de energia elétrica, uma das técnicas mais utilizadas é a alocação de banco de capacitores ao longo do alimentador, porém, é necessário saber, qual a alocação ótima do banco, ou seja, o local onde após a alocação do banco, as perdas sejam as menores possíveis e consequentemente a eficiência a maior possível. Será detalhado, portanto, o algoritmo utilizado para o cálculo da alocação ótima do banco de capacitores em um alimentador e que foi implementado no software PowerCAS.

É importante destacar que os capacitores possuem diversos benefícios ao serem inseridos no sistema de distribuição. Existem dois tipos de capacitores, os capacitores série e os capacitores em derivação, onde os capacitores série servem para compensar os reativos devido ao circuito, já os capacitores em derivação compensam os reativos inseridos no sistema pelas cargas que tem características indutivas geralmente. Em resumo, a instalação de capacitores no sistema elétrico é de fundamental importância, e apresenta os seguintes benefícios[2]:

- Liberação da capacidade instalada, não só na distribuição, mas na transmissão e geração também;
- Reduz as perdas do sistema;
- Regulação de tensão.

O cálculo realizado para alocação ótima do banco de capacitores é bastante simples, porém iterativo, o que significa que, para um alimentador com muitas barras, se torna um processo complexo e repetitivo para se calcular manualmente, sendo ideal o uso de um software para realização deste cálculo. O algoritmo para o cálculo tem a seguinte estrutura:

- Dados e parâmetros do alimentador;
- Cálculo das perdas do alimentador sem o banco de capacitores;
- Cálculo das perdas do alimentador com o banco de capacitores instalado na barra 1, sendo o próximo passo o mesmo cálculo com o banco na barra 2, e assim sucessivamente até a última barra n;
- Análise das perdas para cada situação, observando qual a situação que apresenta a menor perda e conseqüentemente a alocação ótima do banco de capacitores.

As perdas no sistema de distribuição, são dadas por [2]:

$$P = l.H.S_T^2 \quad W \quad (28)$$

Onde:

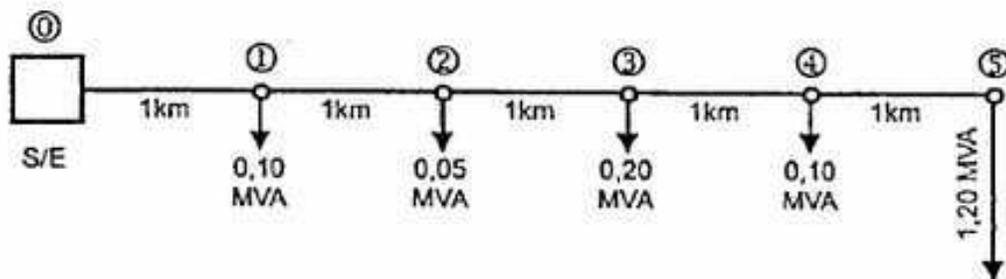
- P: São as perdas do sistema em Watts;
- L: Comprimento do Cabo ou o comprimento entre uma barra e outra;

- H: Perdas unitárias
- S: Representa a potência da carga.
- O H também pode ser representado como as perdas por unidade de carga ao quadrado e de comprimento do alimentador, e pode ser descrito pela fórmula:

$$H = \frac{r}{V_0^2} \frac{MW.km}{MVA^2} \quad (29)$$

Em um sistema de distribuição, as perdas totais serão a soma das perdas do ponto de “vista” da barra 1 somadas com as do ponto de “vista” da barra 2, e assim sucessivamente até a enésima barra. A alocação ótima do banco de capacitores será determinado de forma iterativa, ao se calcular as perdas totais do alimentador sem a instalação do banco de capacitores, e depois, instalando o mesmo na primeira barra e novamente calculando as perdas totais, seguido da instalação do banco na segunda barra para obtenção do novo resultado das perdas totais e assim sucessivamente. Ao término do cálculo, deve-se analisar e comparar os valores das perdas e observar em qual barra o banco foi instalado e se obteve menores perdas, assim se determina o local ótimo do banco de capacitores. Na Figura 11 apresenta-se um alimentador com cinco barras que será utilizado para o exemplo abaixo. O cálculo pode ser visto de forma prática na solução do exemplo a seguir.

Figura 11 - Alimentador Referente ao Exemplo sobre Alocação de Banco de Capacitores.



Fonte: [2]

EXEMPLO (Fonte: [2], Página 80, problema 4.10 Modificado): A impedância do alimentador trifásico de 13,8 kV, da Figura 11, é $0,3 + j0,6 \Omega/\text{km}$. O fator de potência de todas as cargas é 0,8 indutivo. Determine o local ótimo para a instalação do banco de capacitores de 600 kvar.

Solução:

- Perdas antes da instalação do banco:

Como o fator de potência é 0,8; O ângulo será o arco cosseno de 0,8 que é $36,8699^\circ$. Deve-se observar também que para determinar a alocação do banco de capacitores, tem-se que calcular as perdas apenas considerando a parte reativa já que o banco injeta potência somente reativa no alimentador. E sendo assim, calcula-se o fator de multiplicação a ser utilizado no cálculo a seguir, para multiplicar a potência S de cada barra. Este fator é obtido calculando o seno do ângulo $36,8699^\circ$ que é 0,6.

$$P = l.H.(0,6.S_{T1})^2 + l.H.(0,6.S_{T2})^2 + l.H.(0,6.S_{T3})^2 + l.H.(0,6.S_{T4})^2 + l.H.(0,6.S_{T5})^2$$

Logo:

$$P = 1.H.(0,6 \times 1,65)^2 + 1.H.(0,6 \times 1,55)^2 + 1.H.(0,6 \times 1,50)^2 + 1.H.(0,6 \times 1,30)^2 + 1.H.(0,6 \times 1,20)^2$$

$$P = 1.H.0,98 + 1.H.0,86 + 1.H.0,81 + 1.H.0,61 + 1.H.0,52$$

Portanto,

$$P = 3,78.H \text{ Mvar}$$

Como o alimentador do exemplo é trifásico e apresentam o mesmo condutor, as perdas poderão ficar em função do fator de perdas unitárias pois é o mesmo fator para todos os termos.

- Banco de Capacitores na barra 1:

Agora, faz-se o mesmo procedimento de cálculo, porém tendo a potência reativa de 0,6 Mvar do banco de capacitores sendo subtraída da potência da primeira barra.

$$P = 1.H.(0,6x1,65 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,55)^2 + 1.H.(0,6x1,50)^2 + 1.H.(0,6x1,30)^2 + 1.H.(0,6x1,20)^2$$

Então:

$$P = 1.H.0,15 + 1.H.0,86 + 1.H.0,81 + 1.H.0,61 + 1.H.0,52$$

Tem-se:

$$P = 2,95.H \text{ Mvar}$$

- Banco de Capacitores na barra 2:

Como explicado na etapa anterior, será subtraído a potência reativa, do banco de capacitores, da potência da barra 2, porém também será subtraída da barra 1, pois a instalação do banco de capacitores reduz os reativos de todo o circuito que está localizado anterior ao banco, não interferindo com o circuito após o banco.

Logo:

$$P = 1.H.(0,6x1,65 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,55 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,50)^2 + 1.H.(0,6x1,30)^2 + 1.H.(0,6x1,20)^2$$

$$P = 1.H.0,15 + 1.H.0,11 + 1.H.0,81 + 1.H.0,61 + 1.H.0,52$$

Tem-se:

$$P = 2,2.H \text{ Mvar}$$

- Banco de Capacitores na barra 3:

Tem-se que:

$$P = 1.H.(0,6x1,65 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,55 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,50 - 0,6)^2 \\ + 1.H.(0,6x1,30)^2 + 1.H.(0,6x1,20)^2$$

$$P = 1.H.0,15 + 1.H.0,11 + 1.H.0,09 + 1.H.0,61 + 1.H.0,52$$

Portanto,

$$P = 1,48.H \text{ Mvar}$$

- Banco de Capacitores na barra 4:

Tem-se:

$$P = 1.H.(0,6x1,65 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,55 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,50 - 0,6)^2 \\ + 1.H.(0,6x1,30 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,20)^2$$

$$P = 1.H.0,15 + 1.H.0,11 + 1.H.0,09 + 1.H.0,03 + 1.H.0,52$$

Então,

$$P = 0,9.H \text{ Mvar}$$

- Banco de Capacitores na barra 5:

Tem-se:

$$P = 1.H.(0,6x1,65 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,55 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,50 - 0,6)^2 \\ + 1.H.(0,6x1,30 - 0,6)^2 + 1.H.(0,6x1,20 - 0,6)^2$$

$$P = 1.H.0,15 + 1.H.0,11 + 1.H.0,09 + 1.H.0,03 + 1.H.0,01$$

Logo,

$$P = 0,394.H \text{ Mvar}$$

Pode-se concluir que, após todos os cálculos, a instalação do banco de capacitores na barra 5 apresenta menores perdas quando comparado com as perdas com o banco instalado em outras barras. Sendo assim, a alocação ótima do banco de capacitores é na barra 5.

2.7. PREVISÃO DE CARGA

A previsão de carga é o estudo que se faz, analisando o sistema, com o objetivo de estimar, baseando-se nos dados de carga atuais ou em dados simulados, caso ainda não tenha sido construído tal sistema, qual seria a carga em um horizonte futuro, podendo esse horizonte ser à curto prazo, médio ou até longo prazo, dependendo do número de dados que se possui ou ainda do tamanho do sistema[2].

Pode-se perceber portanto, que este estudo é de fundamental importância, pois a expansão do sistema é um dos fatores que podem ter implicações a partir do estudo de previsão de carga. Caso a previsão seja feita de forma conservativa, terá como consequência, o esgotamento da capacidade instalada em um curto espaço de tempo, o que pode causar problemas no serviço de fornecimento de energia elétrica, e problemas específicos como regulação de tensão, já que o sistema estará trabalhando em sobrecarga, entre outros problemas. Em contrapartida, se a previsão for feita de forma muito otimista, se terá um sistema operando com capacidade excessiva, e neste caso o período de *payback*, que é quando o investimento tem o retorno, é mais longo. O estudo de previsão também beneficia os sistemas que já estão em operação, fornecendo informações sobre como será a demanda daqui à uma semana, um mês ou até um ano por exemplo, apenas dependendo da quantidade de dados que já se obtém[11].

A previsão de carga, propriamente dita, é realizada fazendo cálculos de regressão. Os cálculos de regressão, funcionam analisando os dados que se tem, e transformando-os em modelos, basicamente, reconhece um padrão no conjunto de dados, e transforma um modelo, e desta forma, pode-se fazer estimativas de valores futuros e obter resultados bastante satisfatórios.

Os modelos de regressão são diversos, principalmente com o avanço da inteligência artificial e do aprendizado de máquina que utilizam algoritmos de regressão para fazer com que a máquina aprenda e reconheça padrões nos dados, e que assim possa estimar valores futuros ou fazer classificações. Existem os modelos de regressão linear, polinomial, exponencial, potencial, os de árvores de decisão, máquinas de vetores de regressão (SVR), entre muitos outros. Este trabalho, foca nos modelos de regressão polinomial e SVR que foram implementados no desenvolvimento deste software.

2.7.1 REGRESSÃO POLINOMIAL

Um dos modelos bastante utilizados é o de regressão polinomial, por ter vasta aplicação. Este modelo, funciona transformando os dados fornecidos em uma função polinomial de grau n , assim, depois de se obter uma função polinomial a partir dos dados, pode-se estimar valores futuros, e realizar assim, a previsão. O algoritmo de regressão polinomial pode ser descrito da seguinte forma:

- Deve-se determinar os coeficientes do polinômio de ordem n que se ajuste aos m pontos dos dados fornecidos. Tais coeficientes são definidos ao se resolver o sistema de equações lineares como pode ser visto abaixo:

$$C_{00}a_0 + C_{01}a_1 + \dots + C_{0n}a_n = B_0 \quad (30)$$

$$C_{10}a_0 + C_{11}a_1 + \dots + C_{1n}a_n = B_1 \quad (31)$$

Assim sucessivamente, até:

$$C_{n0}a_0 + C_{n1}a_1 + \dots + C_{nn}a_n = B_n \quad (32)$$

Resolvendo o sistema de equações lineares acima, se obterá portanto, o modelo de regressão polinomial.

No desenvolvimento do software PowerCAS, foi utilizado a biblioteca de aprendizado de máquina (*machine learning*) do Python, Scikit Learn, que possui diversas funções de regressão, e

entre elas a de regressão polinomial. Um exemplo de código utilizando esta biblioteca pode ser vista a seguir.

Código:

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression #importa as funções e classes de regressão
lineares a partir da biblioteca Scikit Learn
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures #importa a classe de características
polinomiais
poly_reg = PolynomialFeatures(degree = 3) #cria um objeto da classe de características
polinomiais atribuindo grau 3 a função polinomial
X_poly = poly_reg.fit_transform(X) #transforma os dados fornecidos X com as características
polinomiais de grau 3
lin_reg_2 = LinearRegression() #cria objeto para a classe de regressão linear
lin_reg_2.fit(X_poly, y) #cria o modelo de regressão utilizando como dados a variável X agora
com características polinomiais e a variável y também fornecida.
```

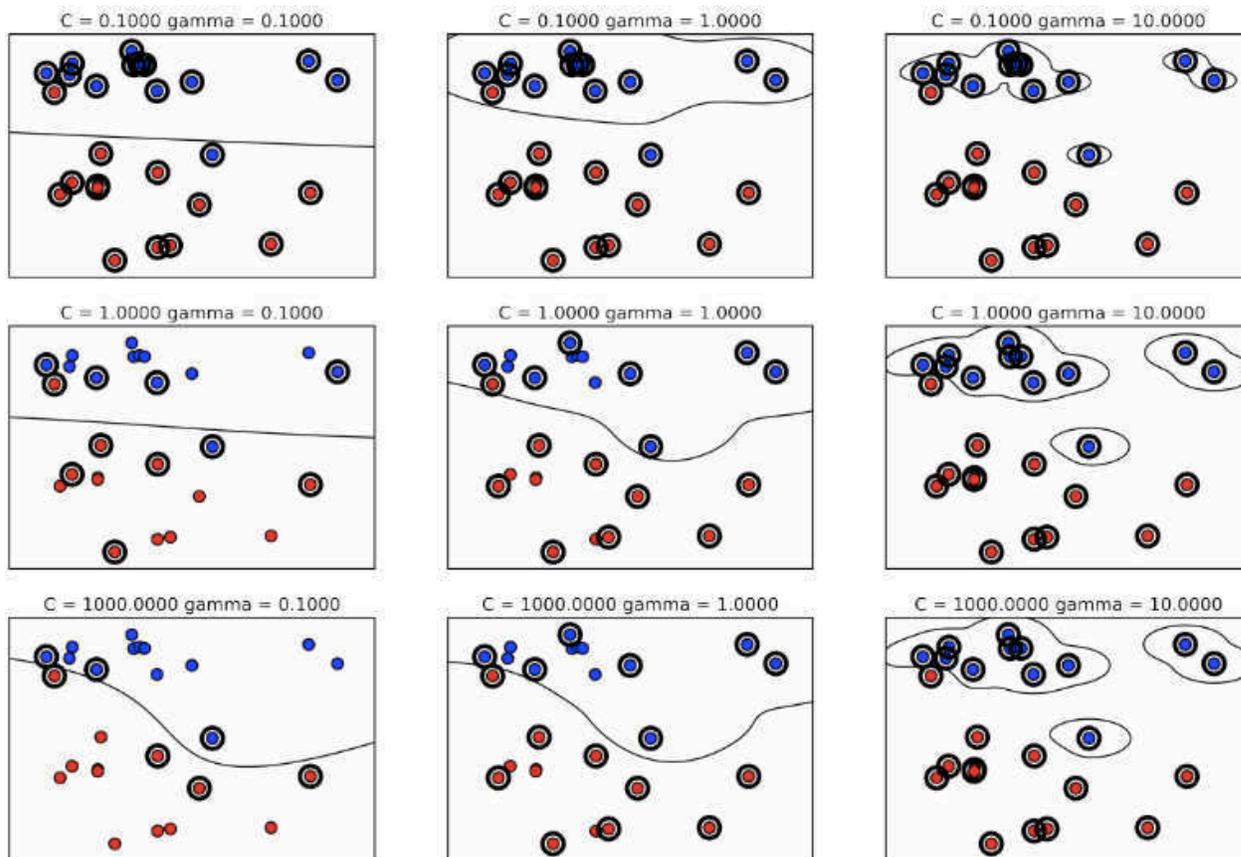
2.7.2 REGRESSÃO VETORES DE SUPORTE DE REGRESSÃO (SVR)

Este modelo de regressão, é bastante importante e amplamente utilizado em aprendizado de máquina, principalmente para conjunto de dados não lineares. Como mencionado, com o avanço de áreas como inteligência artificial, aprendizado de máquina e ciência dos dados, diversos algoritmos são desenvolvidos para que a máquina possa “aprender” de forma mais eficiente, e é essencial que se entenda como tais modelos funcionam[6].

Os modelos SVR aprendem separando o conjunto de dados em dois, criando dois subconjuntos. Os modelos aprendem o quão importante cada conjunto de pontos é para a fronteira de decisão entre duas classes, e geralmente apenas um subconjunto de pontos são realmente o que importam para definir a fronteira de decisão, e são os que ficam na fronteira entre as duas classes ou subconjuntos criados. São justamente estes que são chamados de vetores de suporte e dão nome ao modelo[6].

Este modelo, prevê um novo ponto, baseando-se na distância medida para os vetores de suporte. Faz uma decisão de classificação a partir desta distância e a importância dos vetores de suporte que foi aprendida durante a fase de treinamento. Um dos pontos negativos deste modelo, é que este pode fazer ajustes extremos, e acabar dando estimativas não tão boas, podendo ter uma precisão boa no conjunto de dados de treino, mas não tão boas no conjunto de teste, pois é um modelo bastante sensível aos parâmetros do modelo, o primeiro parâmetro (C) representa a partir de qual distância os pontos são importantes ou basicamente onde começam os vetores de suporte, um valor pequeno deste parâmetro representa um modelo muito restrito, onde cada ponto terá uma influência pequena, aumentando o valor de C , os vetores de suporte terão uma influência mais forte no modelo. Já o segundo parâmetro (γ) determina a escala que representa o que significa pontos estarem próximos, um valor pequeno para γ significa que muitos pontos serão considerados próximos e sua fronteira de decisão variará lentamente. O modelo SVR com seus parâmetros variando e suas implicações, pode ser visualizado conforme a Figura 12, onde pode ser observado que conforme o parâmetro C aumenta, os vetores de suporte possuem maior influência sobre a fronteira limite e assim consequentemente no aprendizado do modelo, na horizontal também pode ser observado o parâmetro γ aumentando e conforme isso ocorre, é determinado o quão próximo os dados estão um do outro do ponto de vista do modelo, ou mais tecnicamente o γ determina o raio do kernel no modelo SVR. Para desenvolvimento do modelo, foi utilizado também a biblioteca Scikit Learn, e a classe de regressão SVR.

Figura 12 - Modelo de Regressão SVR – Variação dos Parâmetros C e Gamma.



Fonte: [6]

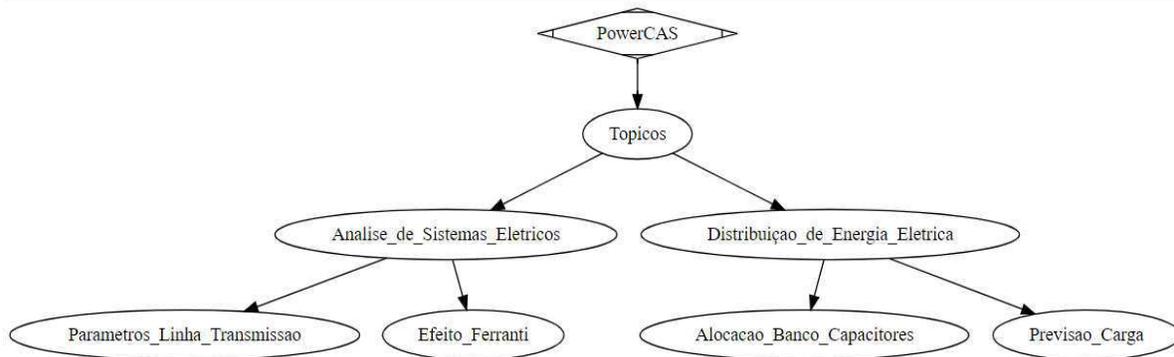
3. POWERCAS

Esta seção apresenta o software desenvolvido e todas as suas funcionalidades, desde a interface gráfica inicial, assim como cada interface propõe a resolução de um problema na área de Engenharia de Potência.

3.1. PANORAMA GERAL

Na Figura 13 apresenta-se o diagrama com a análise hierárquica de tarefas do software.

Figura 13 – Diagrama da Análise Hierárquica de Tarefas do PowerCAS.



Fonte: Autoria Própria

A partir deste diagrama, pode-se observar que o software possui uma interface inicial, e que desta interface, é possível escolher entre duas áreas que são Análise de Sistemas Elétricos, onde o software se propõe a resolver dois problemas de extrema importância da área, e também a área de Distribuição de Energia Elétrica, onde se apresenta dois problemas bastante recorrentes atualmente. Na Figura 14 apresenta-se uma imagem com a captura de tela da interface inicial do PowerCAS.

Figura 14 - Captura de tela da Interface Gráfica Inicial do PowerCAS.

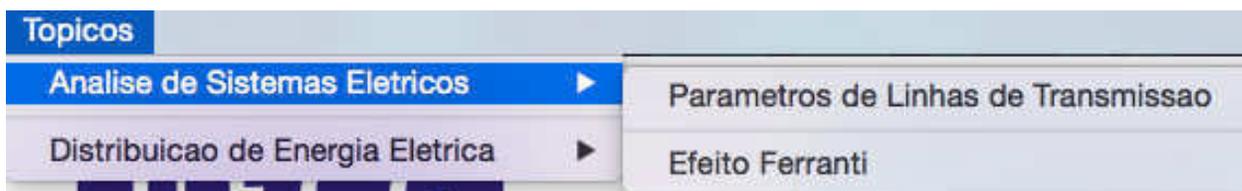


Fonte: Autoria Própria.

3.2. ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS – PARÂMETROS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Para acessar à esta funcionalidade, deve-se ir no menu localizado acima da interface inicial, onde está escrito Tópicos, e selecionar Análise de Sistemas Elétricos -> Parâmetros de Linha de Transmissão, conforme a Figura 15.

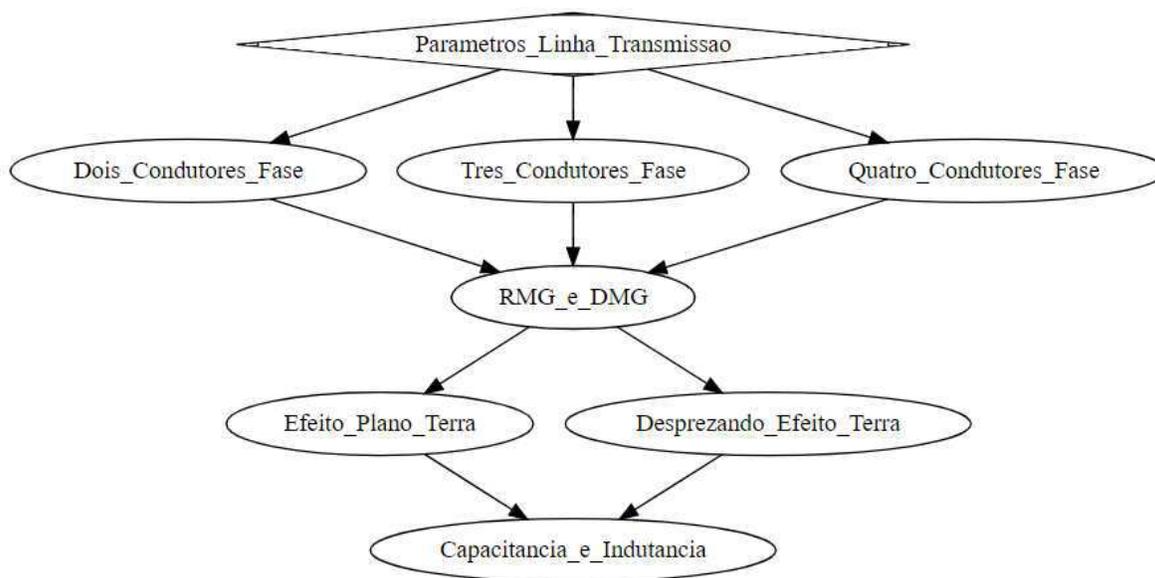
Figura 15 - Selecionando a Janela de Parâmetros de Linhas de Transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar também a estrutura da função, a partir da Análise Hierárquica de Tarefas (AHT) apresentada no diagrama da Figura 16.

Figura 16 - Diagrama AHT da Função Parâmetros de Linhas de Transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

A interface inicial da aplicação “Parâmetros de Linhas de Transmissão”, pode ser visualizada conforme a Figura 17.

Figura 17 - Interface Inicial da Aplicação Parâmetros de Linhas de Transmissão.



Fonte: Autoria Própria.

Como exemplo de cálculo para apresentar o funcionamento prático desta aplicação, será utilizado o mesmo exemplo da seção 2.4, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Selecionando a Opção de Dois Condutores por fase.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 19, podem ser observados todos os dados preenchidos, e os resultados fornecidos de reatância e capacitância por quilômetro (km) para a opção de dois condutores por fase, assim como descrito no exemplo mencionado. O mesmo processo pode ser feito se selecionado as opções com três ou quatro condutores por fase.

Figura 19 - Dados Preenchidos e Resultado Fornecido de Reatância e Capacitância por km.

2 Condutores por fase

3 Condutores por fase

4 Condutores por fase

Distancia entre os condutores da fase a e b em metros: 10

Distancia entre os condutores da fase b e c em metros: 10

Distancia entre os condutores da fase c e a em metros: 20

Espacamento entre os condutores de mesma fase em metros: 0.4

Forneça o Rs do condutor (GMR): 0.0079

Ok

O RMG e': 0.05621387729022079

O DMG e': 12.59921049894873

Desprezando Efeito Plano-Terra

Com Efeito do Plano-Terra

Qual a altura dos condutores da Fase a: 20

Qual a altura dos condutores da Fase b: 20

Qual a altura dos condutores da Fase c: 20

A Reatancia e Capacitancia e':

A Reatancia serie da linha e' em Ohms/km: 0.40806017482385976

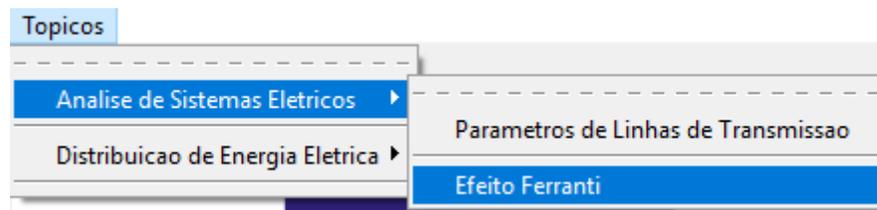
A Capacitancia da linha e' em F/km: 1.192800715529291e-08

Fonte: Próprio Autor.

3.3. ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS – EFEITO FERRANTI

Para acessar esta aplicação, deve-se ir na barra de tarefas em Tópicos, em seguida, Análise de Sistemas Elétricos e selecionar a opção Efeito Ferranti, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Selecionando a Opção “Efeito Ferranti”.



Fonte: Próprio Autor.

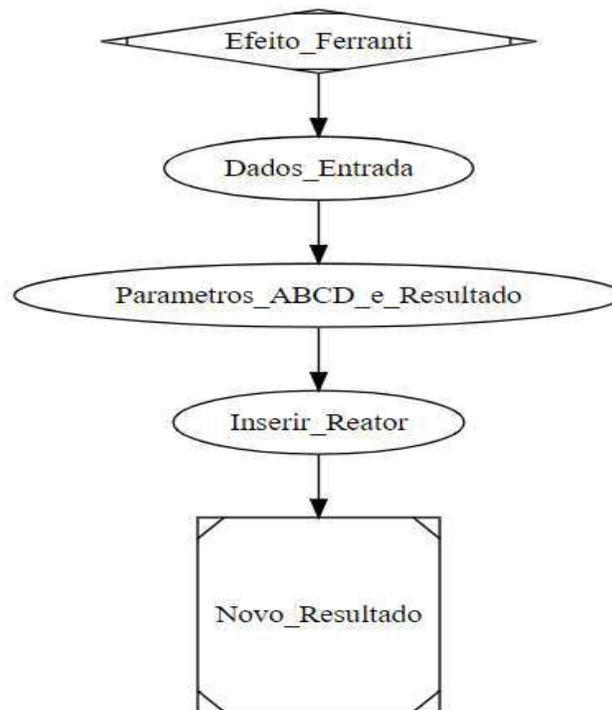
Selecionando esta opção, a janela desta aplicação será aberta e exibirá a interface inicial como apresentado pela Figura 21.

Figura 21 - Interface Inicial - Efeito Ferranti.

Fonte: Aatoria Própria.

Já o diagrama AHT que descreve esta função pode ser visto conforme a Figura 22.

Figura 22 - Diagrama AHT da Função “Efeito Ferranti”.



Fonte: Aatoria Própria.

Para apresentar a função de forma prática, foram utilizados os mesmos dados do exemplo apresentado na seção 2.5, onde pode ser observado que os valores foram os mesmos conforme a Figura 23.

Figura 23 - Dados do Exemplo Preenchidos e Resultado Obtido – Efeito Ferranti.

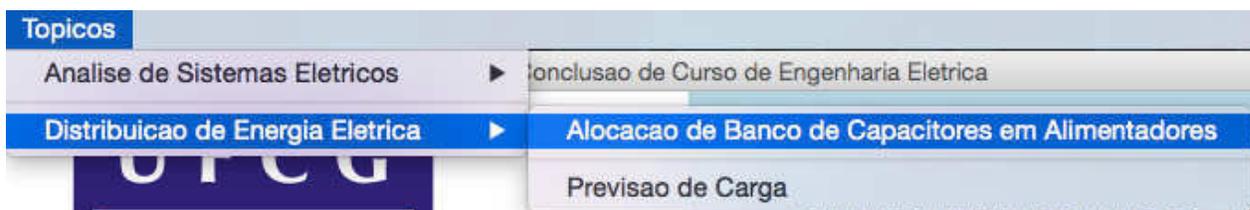
Tensao da Transmissao em kV:	345
Resistencia do Condutor em Ohms/km a 60Hz:	0.0372
Reatancia do Condutor em Ohms/km:	0.3604
Admitancia em S/km:	0.0000046
Comprimento da Linha em km:	355
Ok	
Parametros ABCD:	
A: (0.895535357+0.010782699j) B: (13.206+127.942j)	
C: (-8.804073733499999e-06+0.0015477046189905j) D: (0.895535357+0.010782699j)	
A Tensao no terminal receptor em aberto e':	385.2164987609581 kV, 11.656956162596543% acima da Tensao nominal
Para evitar tensoes elevadas no receptor, deve-se inserir um reator no terminal receptor:	
Insira o valor da Potencia Reativa do reator que deseja instalar em Mvar:	50
Ok	
A Tensao no terminal receptor apos insercao do reator e':	363.4273497144361 kV
	5.341260786793072% acima da Tensao nominal

Fonte: Autoria Própria.

3.4. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM ALIMENTADORES

Esta aplicação faz parte da área de distribuição de energia elétrica, e pode ser acessada selecionando Tópicos na barra de tarefas, e na opção Distribuição de Energia Elétrica e em seguida a opção Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores, conforme a Figura 24.

Figure 24 - Selecionando a Opção Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores.



Fonte: Autoria Própria.

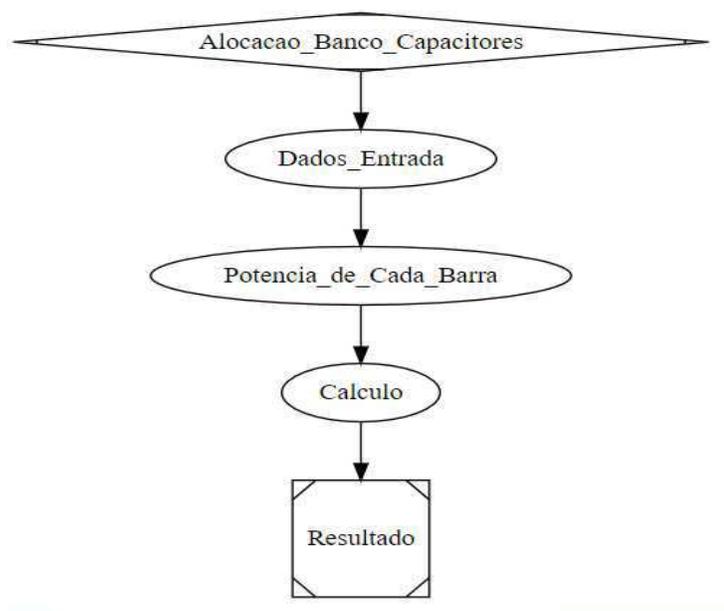
Ao escolher esta opção, a interface da aplicação será exibida, e pode ser visualizada como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Interface Inicial da Aplicação Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores.

Fonte: Autoria Própria.

É importante observar também o diagrama AHT da aplicação, que apresenta basicamente, como funciona a aplicação, ou como a mesma é estruturada. O diagrama pode ser visualizado conforme a Figura 26.

Figura 26 - Diagrama AHT da Função Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores.



Fonte: Próprio Autor.

A função Alocação de Banco de Capacitores em Alimentadores quando em funcionamento, pode ser vista solucionando o exemplo apresentado na seção 2.6. Conforme a Figura 27.

Figura 27 - Dados do Exemplo Preenchidos e Resultado Obtido – Alocação Ótima de Banco de Capacitores.

Alocacao Otima de Banco de Capacitores em um Alimentador

Para definir o alimentador siga as instrucoes a seguir:

Quantas barras tem o Alimentador:	5
Qual a distancia entre as barras em km:	1
Qual a resistencia do condutor utilizado em Ohms por km:	0.3
Qual a reatancia do condutor utilizado em Ohms por km:	0.6
Qual o fator de potencia do alimentador:	0.8
Qual a Potencia Reativa em Mvar do Banco de Capacitores:	0.6
Ok	
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	0.1
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	0.05
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	0.2
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	0.1
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	1.2
Calculo	

A Alocacao otima do Banco de Capacitores e¹ na barra 5

Fonte: Próprio Autor.

Considerando ainda outro exemplo de alimentador, que apresenta a mesma estrutura que o exemplo anterior, porém com 4 barras, um fator de potência de 0,85 (indutivo), e com 2 MVA, 1,5 MVA, 0,5 MVA e 0,1 MVA de potência em cada barra respectivamente. Pode ser visto a solução na Figura 28.

Figure 28 - Dados Preenchidos e Resultado Obtido – Alocação Ótima de Banco de Capacitores.

Para definir o alimentador siga as instrucoes a seguir:

Quantas barras tem o Alimentador:	4
Qual a distancia entre as barras em km:	3
Qual a resistencia do condutor utilizado em Ohms por km:	0.65
Qual a reatancia do condutor utilizado em Ohms por km:	0.34
Qual o fator de potencia do alimentador:	0.85
Qual a Potencia Reativa em Mvar do Banco de Capacitores:	0.6
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	2
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	1.5
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	0.5
Potencia em MVA da barra acumulada no final do trecho:	0.1

A Alocacao otima do Banco de Capacitores e' na barra 3

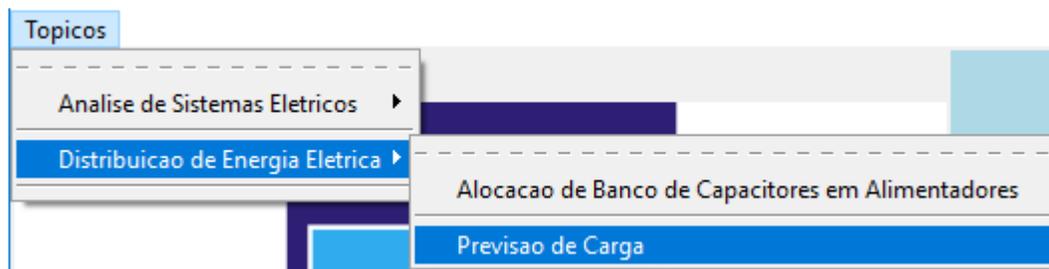
Fonte: Próprio Autor.

3.5. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PREVISÃO DE CARGA

Esta aplicação tem como objetivo fazer previsões de carga a partir dos dados inseridos pelo usuário, que pode escolher quantos dados serão colocados, assim como, pode escolher qual algoritmo utilizar para previsão de carga, entre o algoritmo de regressão polinomial e o de máquinas de vetores de suporte (SVM ou SVR para regressão de vetores de suporte). Foi desenvolvida uma função para previsão de carga “*previsão_carga()*”, e foram utilizados algoritmos de regressão, de aprendizado de máquina, mencionados acima, de regressão polinomial e SVR através da biblioteca de aprendizado de máquina do Python, a Scikit Learn.

Para selecionar esta aplicação, deve-se selecionar Tópicos, em seguida, Distribuição de Energia Elétrica, e então, Previsão de Carga, conforme pode ser visualizado na Figura 29.

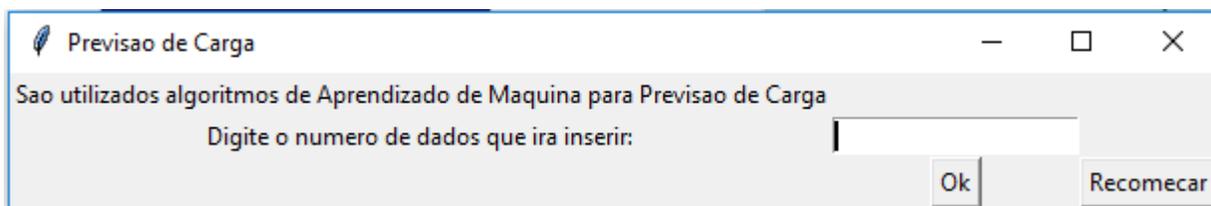
Figura 29 - Selecionando a Aplicação Previsão de Carga.



Fonte: Autoria Própria.

Ao selecionar esta opção, a interface inicial da aplicação será exibida, como pode ser observado na Figura 30.

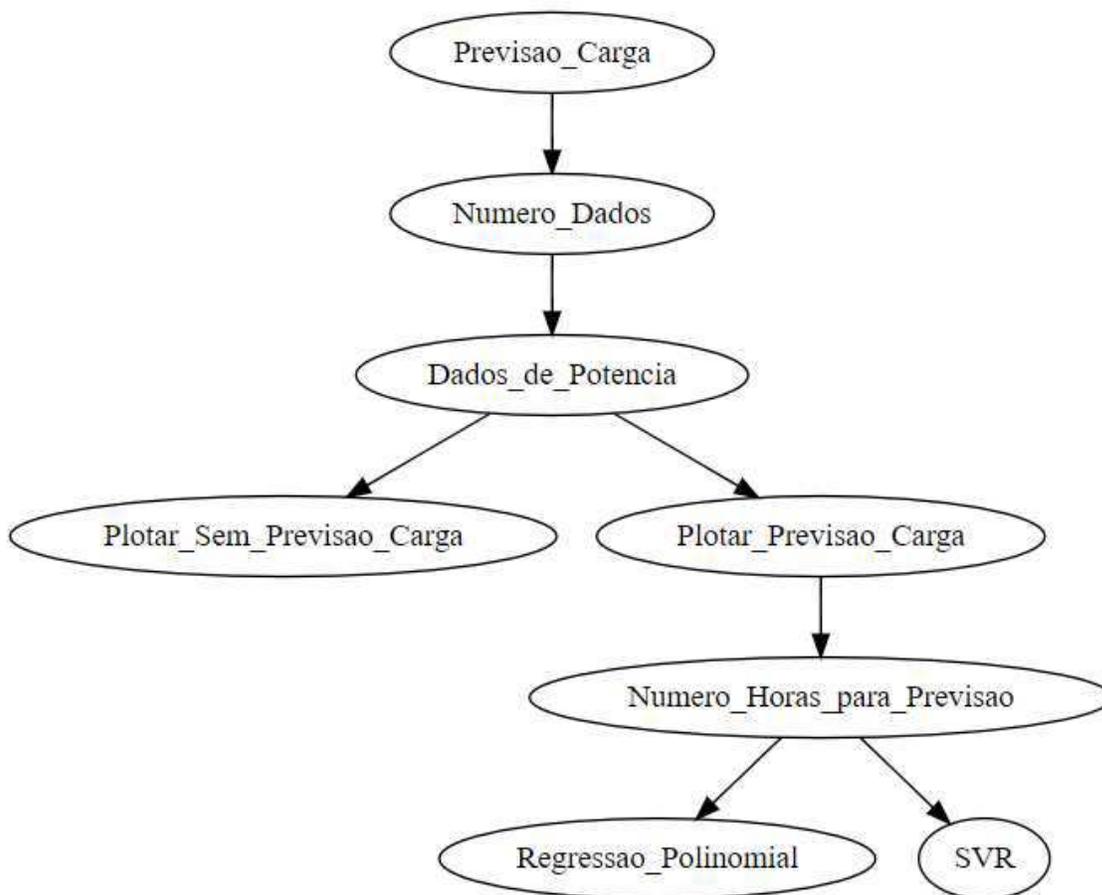
Figura 30 - Interface Inicial da Aplicação Previsão de Carga.



Fonte: Próprio Autor.

Já a estrutura desta função, pode ser vista no diagrama AHT da Figura 31.

Figura 31 - Diagrama AHT da Aplicação Previsão de Carga.



Fonte: Autoria Própria.

Como forma de apresentar o programa em funcionamento, serão utilizados dois conjuntos de dados para os modelos de regressão. Um conjunto de dados que representam uma função polinomial e um conjunto de dados que representam o consumo de energia elétrica de uma residência. É interessante observar que estes modelos de aprendizado de máquina, foram implementados com o objetivo de fazer a previsão de carga, porém, podem ser usados como uma ferramenta para quaisquer conjuntos de dados e devido a este fato, não foi definida as unidades de potência e tempo, pois dependerá dos dados que cada usuário irá inserir, podendo no caso de previsão de carga por exemplo, a unidade ser kW ou KVA e o tempo em horas, dias ou meses e assim sucessivamente.

- $F(x) = x^3 - 4x^2 + x + 3$:

Para a função acima, pode-se observar o preenchimento de um conjunto com 10 valores e os resultados obtidos a partir dos dois modelos de regressão, assim como os valores previstos por estes modelos para um horizonte de 5 “horas” ou de 5 dados à frente. Como pode ser visto na Figura 32 o preenchimento dos dados da função, e nas Figuras 33 e 34 os valores previstos pelos modelos de regressão.

Figura 32 - Preenchimento dos Dados para a Função $x^3 - 4x^2 + x + 3$.

Sao utilizados algoritmos de Aprendizado de Maquina para Previsao de Carga

Digite o numero de dados que ira inserir:

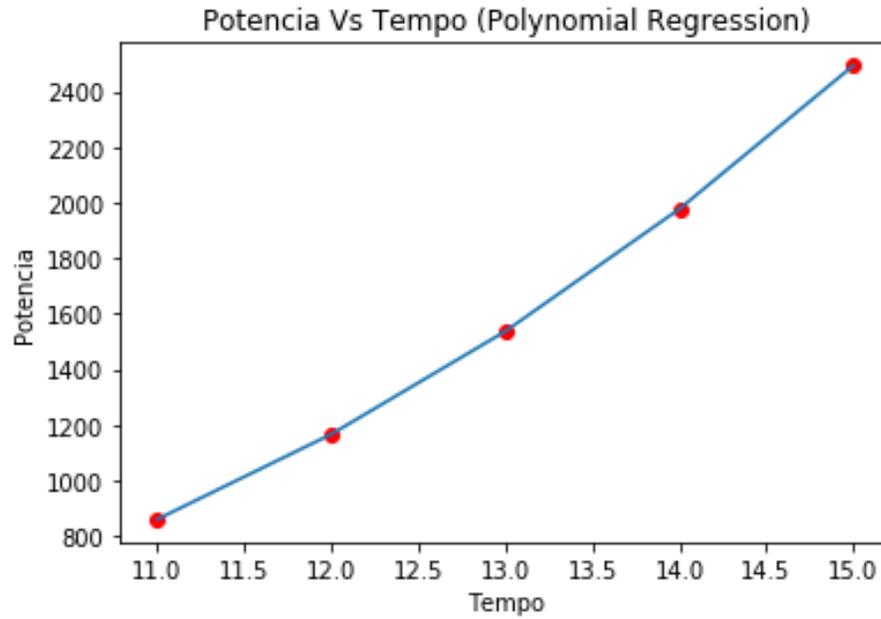
Potencia na barra:

1	1
-3	2
-3	3
7	4
33	5
81	6
157	7
267	8
417	9
613	10

Plotar dados sem Previsao de Carga Plotar dados com Previsao de Carga

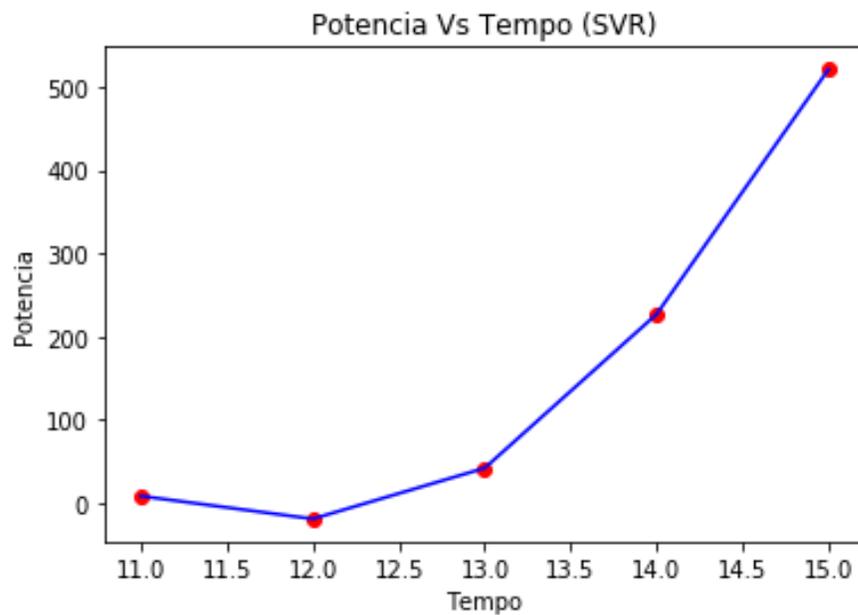
Fonte: Autoria Própria.

Figura 33 - Previsão de Carga – Regressão Polinomial.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 34 - Previsão de Carga - SVR.



Fonte: Autoria Própria.

Os valores reais da função, para $x = (11, 12, 13, 14, 15)$ são: 861, 1167, 1537, 1977 e 2493. O modelo SVR teve como resultado os valores: 8, -18, 42, 227 e 521. Enquanto que o

modelo polinomial teve exatamente os mesmos resultados que os valores reais da função como esperado.

- Conjunto de dados de consumo de energia elétrica:

Tabela 1 - Consumo de Energia Elétrica em kWh para cada mês.

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Consumo (kWh)	156	158	177	151	140	152	109	123	165	137	133	123	120	128	125	122

Fonte: Autoria Própria.

Dos dados da Tabela 1, serão usados 12 dados para criar os dois modelos de regressão, e serão previstos 5 dados para comparar com os valores dos meses 13, 14, 15 e 16.

Os dados preenchidos podem ser visualizados na Figura 35. Os modelos de regressão podem ser vistos nas Figuras 36, 37, 38 e 39 e a previsão para os 5 valores à frente podem ser vistos nas Figuras 40, 41 e 42.

Figura 35 - Dados Preenchidos dos Valores de Consumo de Energia Elétrica.

Previsao de Carga

Sao utilizados algoritmos de Aprendizado de Maquina para Previsao de Carga

Digite o numero de dados que ira inserir:

Potencia na barra:

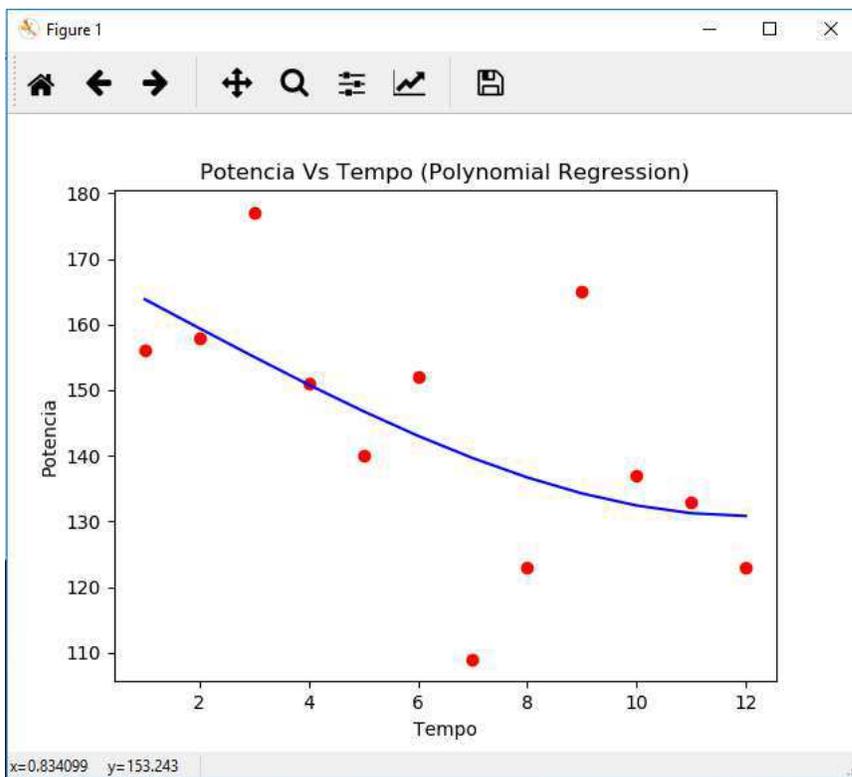
Tempo:

Plotar dados sem Previsao de Carga Plotar dados com Previsao de Carga

Fonte: Autoria Própria.

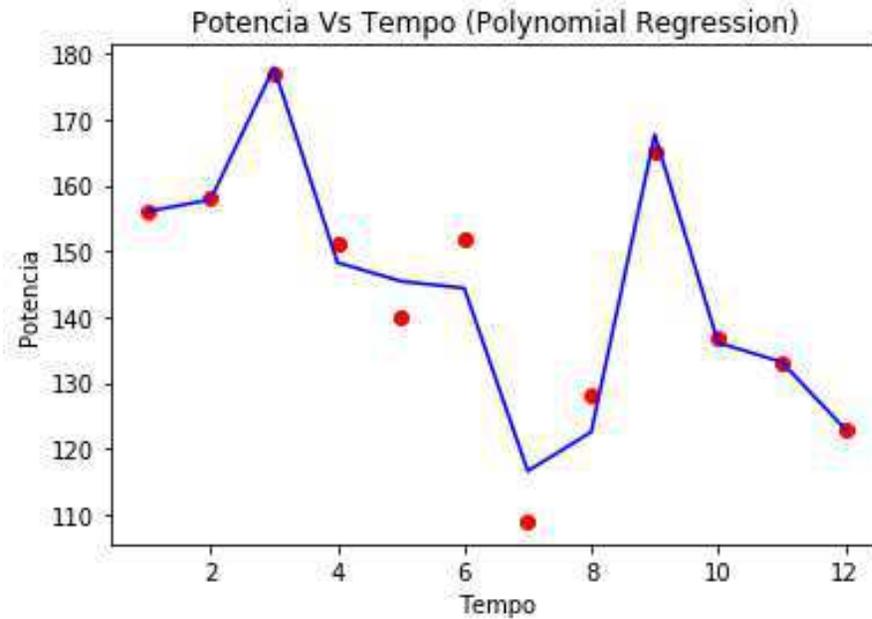
Nas Figuras 36 e 37 apresenta-se o modelo de regressão polinomial, onde foi ajustado o grau do polinômio para se obter um modelo que se adaptasse aos dados inseridos. Variando o grau do polinômio de $n=3$ para $n=10$, foi possível chegar a um modelo que se adapta bem aos pontos inseridos conforme pode ser observado nas Figuras.

Figura 36 - Modelo de Regressão Polinomial com grau 3.



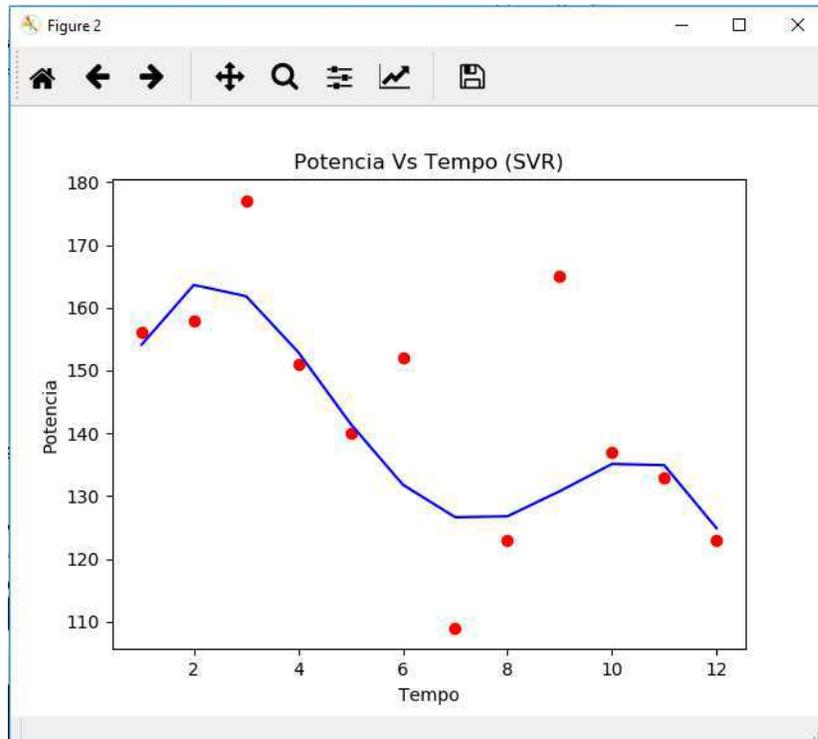
Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 - Modelo de Regressão Polinomial com grau 10.

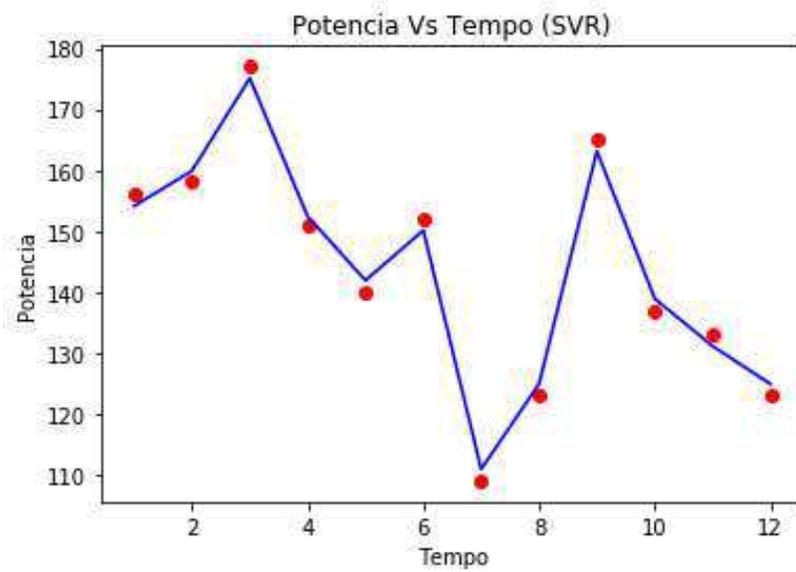


Fonte: Autoria Própria.

Esse ajuste de parâmetros faz parte do aprendizado supervisionado, onde o desenvolvedor pode ir ajustando os parâmetros no código, para que o modelo aprenda de forma mais eficiente, e isso serve para todos os modelos e assim também foi realizado para o modelo SVR como pode ser visto nas Figuras 38 e 39 onde para a Figura 38 os parâmetros eram $C = 10000$ e o $\gamma = 0,1$ e para a Figura 39 é apresentado o modelo com os parâmetros $C = 10$ e o $\gamma = 0,1$, de onde pode ser observado um modelo que se ajustou bem melhor ao comportamento real dos dados.

Figura 38 - Modelo de Regressão SVR com $C = 10000$ e $\text{Gamma} = 0,1$.

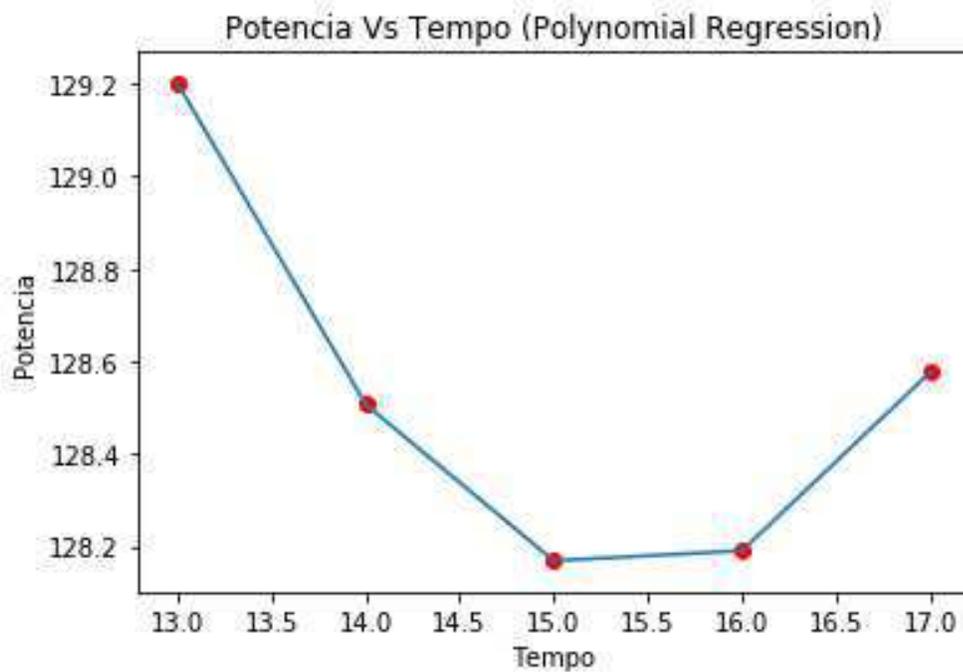
Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 - Modelo de Regressão SVR com $C = 100$ e $\text{Gamma} = 10$.

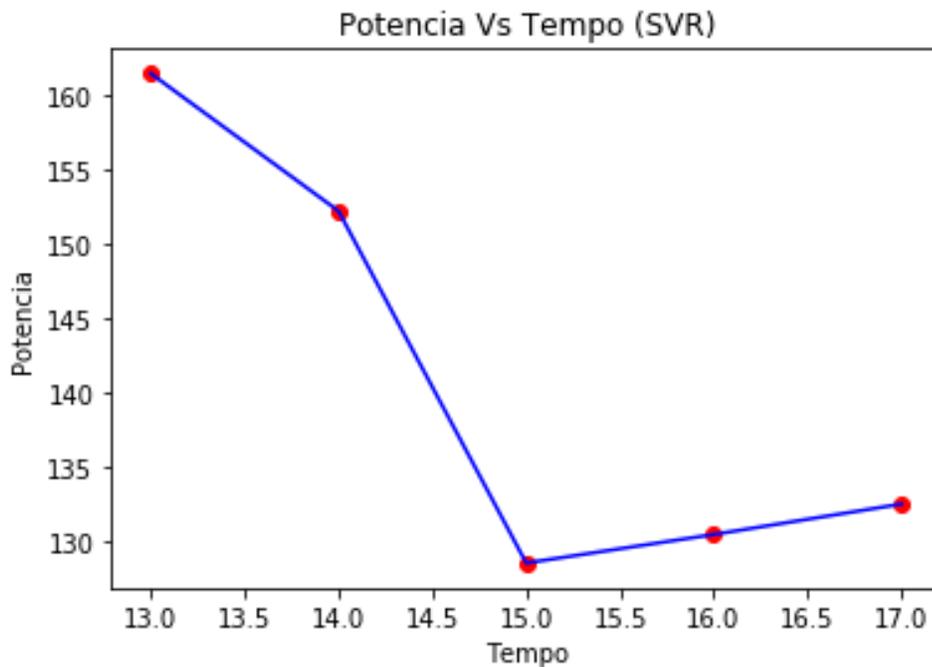
Fonte: Autoria Própria.

Já nas Figuras 40, 41 e 42 apresentam-se justamente as previsões para 5 valores futuros a partir dos modelos treinados.

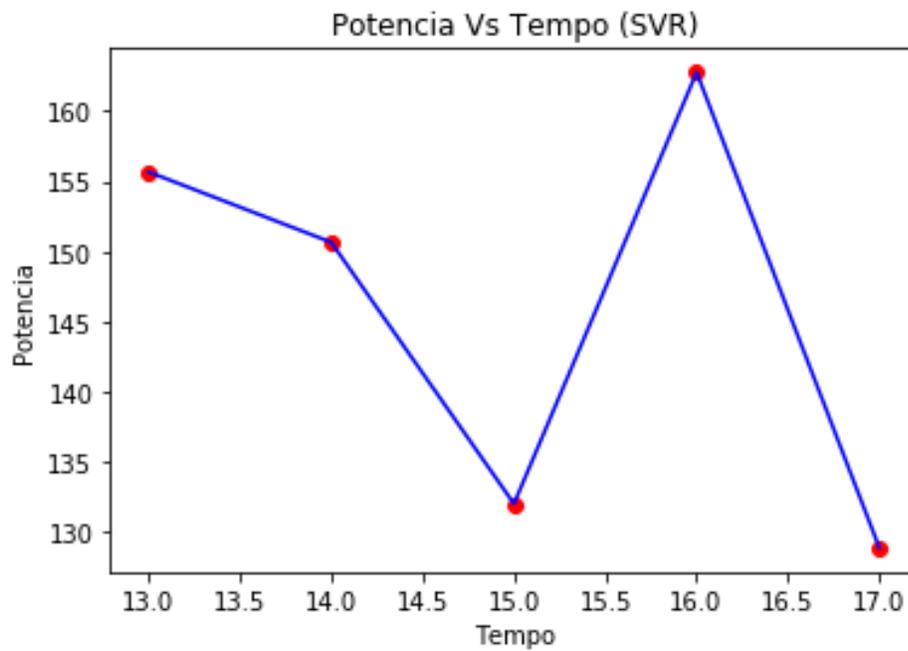
Figura 40 - Resultado da Previsão para 5 dados à Frente – Regressão Polinomial com grau 3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 41 - Resultado da Previsão para 5 dados à Frente – Regressão SVR – $C = 10000$ e $\text{Gamma} = 0,1$.

Fonte: Aatoria Própria.

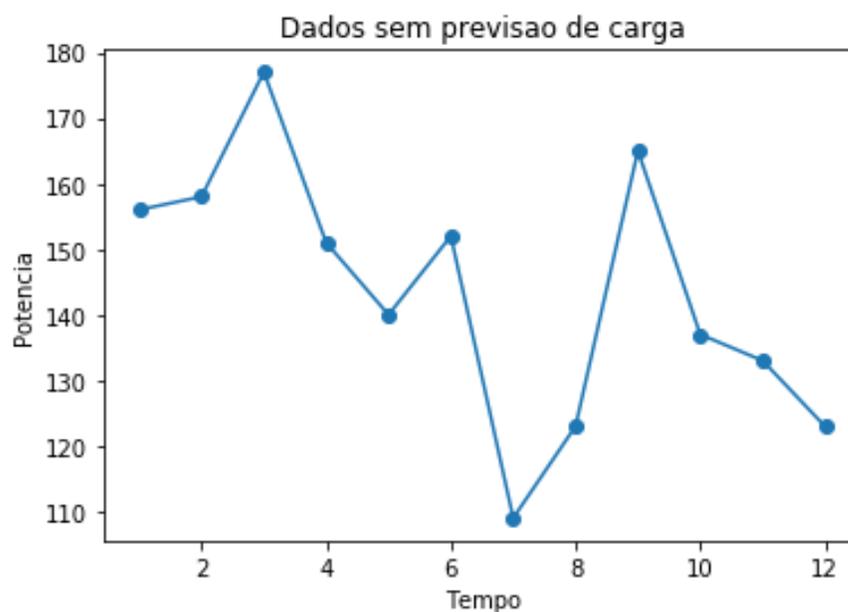
Figura 42- Resultado da Previsão para 5 dados à Frente – Regressão SVR – $C = 10$ e $\text{Gamma} = 10$.

Fonte: Aatoria Própria.

O modelo polinomial fez a previsão para os cinco valores e são eles: 129, 129, 128, 128 e 129. Os dados reais foram: 120, 128, 125 e 122 para os meses 13, 14, 15 e 16; e os dados pelo modelo SVR foram: 162, 151, 129, 130 e 132 para $C = 10000$ e $\text{Gamma} = 0,1$ e 156, 151, 132, 163 e 129 para $C = 10$ e $\text{Gamma} = 10$. Quanto mais dados fornecidos, melhor serão os modelos de regressão e conseqüentemente, melhor serão as previsões.

Ainda há a opção de plotar os dados sem a previsão de carga, caso o usuário deseje visualizar seus dados em função do tempo antes de plotar os modelos de regressão. Esta opção pode ser selecionada antes ou depois de selecionar a opção para previsão de carga. Tal opção pode ser vista conforme a Figura 43.

Figura 43 - Dados Plotados sem Previsão de Carga.



Fonte: Autoria Própria.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um software com uma interface gráfica que fosse utilizada como uma ferramenta para engenheiros e alunos de engenharia elétrica, para estudos, simulações e resolução de problemas importantes na área de engenharia de potência. Foi bastante interessante e proveitoso a realização deste trabalho, pois ao final deste, foi possível adquirir diversos conhecimentos e técnicas que podem ser usadas inclusive em outras áreas de estudo. Pois, foi objeto de estudo para desenvolver este trabalho, tanto os algoritmos de cálculos que são utilizados na área de engenharia de potência, como o desenvolvimento de software e de uma interface gráfica a partir do “zero”.

É importante mencionar ainda, que atualmente, é essencial que os profissionais sejam interdisciplinares e dispostos a aprender e atuar em áreas que demandam conhecimentos específicos e não tão específicos da área, de forma a se tornar um profissional mais “completo” e de fácil adaptação. A formação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, forma profissionais justamente que tenham base para atuar em qualquer setor da Engenharia Elétrica, e foi essa a preparação que o autor sentiu para confortavelmente desenvolver este trabalho que lida tanto com a área de sistemas elétricos quanto com a área de desenvolvimento de software ou de controle e automação.

5. REFERÊNCIAS

- [1] GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes. **Distúrbios de Tensão em Redes Elétricas Notas de Aula**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande.
- [2] SOUZA, Benemar Alencar de. **Distribuição de Energia Elétrica**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, 1997.
- [3] NEVES, Washington L. A. **Análise de Sistemas Elétricos - Unidade 3 (Slides Notas de Aula)**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2016.
- [4] SOMMERVILLE, Ian. **Software Engineering**. 9 Ed. Pearson, 2011.
- [5] GRAYSON, John E. **Python and Tkinter Programming**. 1 Ed. Manning, 2000.
- [6] MÜLLER, Andreas C.; GUIDO. Sarah. **Introduction to Machine Learning with Python**. 1 Ed. O'Reilly, Junho de 2016.
- [7] GLOVER, J. Duncar; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas. **Power System Analysis and Design**. 5 Edição. Global Engineering, 2012.
- [8] GÉRON, Aurélien. **Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow**. 1 Edição. O'Reilly, Março de 2017.
- [9] NETO, Amir Borges Ferreira; CORRÊA, Wilson Luiz Rotatori; PEROBELLI, Fernando Salgueiro. **Consumo de Energia e Crescimento Econômico: Uma Análise do Brasil no período 1970-2009**. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/AnaliseEconomica/article/viewFile/44622/36642>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- [10] WOLFOVITCH, J.; BARBOSA, Daniel; SILVA, Kleber Freire da. **Redução das Perdas Elétricas nas Linhas de Distribuição com a Mudança na Topologia da Rede: Estudo de Caso**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303944865_Reducacao_das_Perdas_Eletricas_nas_Linhas_de_Distribuicao_com_a_Mudanca_na_Topologia_da_Rede_Estudo_de_Caso. Acesso em: 18 dez. 2018.
- [11] Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Previsões de Carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2018 – 2022**. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-258/Boletim%20Tecnico%20EPE-ONS-CCEE%20-%20Previs%C3%A3o%20de%20Carga%20para%20o%20Planejamento%20Anual%20da%20Op>

era%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica%20-%202018-2022.pdf. Acesso em: 20 dez. 2018