



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS

CAMPUS DE PALMAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexandre Souza Santos

**ANÁLISE DE UMA REDE DISTRIBUIÇÃO PERANTE
ALTERAÇÕES NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL**

Palmas/TO
2021

Alexandre Souza Santos

**ANÁLISE DE UMA REDE DISTRIBUIÇÃO PERANTE
ALTERAÇÕES NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador<a>: Dr. Sergio Manuel Rivera

Palmas/TO
2021

<https://sistemas.uft.edu.br/ficha/>

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S237a Santos, Alexandre Souza.

ANÁLISE DE UMA REDE DISTRIBUIÇÃO PERANTE ALTERAÇÕES
NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL. / Alexandre Souza Santos. – Palmas,
TO, 2021.

39 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.

Orientador: Sergio Manuel Rivera

1. Redes de Distribuição radial. 2. Modelagem estática de Cargas. 3.
Método da Soma de potências. 4. Python. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

FOLHA DE APROVAÇÃO

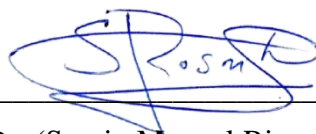
Alexandre Souza Santos

Análise de uma rede distribuição perante alterações na frequência fundamental:

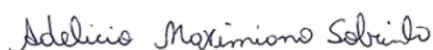
Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia elétrica para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 20/05/2021

Banca Examinadora



Prof. Dr. (Sergio Manuel Rivera), UFT



Prof. Dr. (Adelicio Maximiano Sobrinho), UFT



Maxwell Diógenes B. de Melo
Prof. de Engenharia Elétrica
2020/2021

Prof. Dr. (Maxwell Diógenes Bandeira de Melo), UFT

Palmas, 2021

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso aborda-se as redes de distribuição radial, será abordado e discutido sobre faltas na rede e os quedas de tensões momentâneas que causa nas barras, o sistema de rede a ser utilizado será o IEEE 33 barras, para representar o sistema propõe-se utilizar modelagem de cargas estáticas mais especificamente o modelo de carga ZIP (impedância, corrente, potencia), para a análise as cargas utilizadas levam em consideração a variação da frequência fundamental do sistema verificando o impacto que causam em uma rede de distribuição, e também é proposto fazer uma análise do comportamento da tensão no sistema, será abordado sobre o fluxo de potência e o utilizado para análise é o método de soma de potencias, mostrando o funcionamento do mesmo, falando sobre a varredura a frente e a varredura reversa, este método será implementado utilizando um código em linguagem de programação Python utilizando-se algumas de suas bibliotecas.

Palavras-chaves: Redes de Distribuição radial. Modelagem estática de Cargas. Método da Soma de potências. Python.

ABSTRACT

In this course completion paper addresses the radial distribution networks, will be addressed and discussed about faults in the network and voltage sags that cause the bars, the network system to be used will be the IEEE 33 bars, to represent the system proposes to use static load modeling more specifically the load model ZIP (impedance, current, power), for the analysis of the loads used take into account the variation of the fundamental frequency of the system checking the impact they cause in a distribution network, It is also proposed to make an analysis of the voltage behavior in the system, will be discussed about the power flow and used for analysis is the sum-of-power method, showing the operation of it, talking about the forward sweep and reverse sweep, this method will be implemented using a code in programming language called Python using some of its libraries.

Keywords: Radial distribution. Loads static. Power sum. Modeling. Python

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Sistema IEEE 33 barras	12
Figura 2- fluxograma dos metodos a serem utilizados	15
Figura 3- Gerador acoplado a uma turbina	17
Figura 4- Rede de distribuição malhade IEEE 14 barras.....	18
Figura 5- Rede de distribuição radial IEEE 33 barras	18
Figura 6- Rede radial genérica mostrando a varredura a frente (<i>forward sweep</i>)	20
Figura 7- Rede radial genérica mostrando a varredura reversa (<i>backward sweep</i>).....	20
Figura 8- Tabelas no código original.....	25
Figura 9- Alteração no código	26
Figura 10- Interface gráfica parte 1	27
Figura 11- Interface gráfica parte 2	27
Figura 12- Interface gráfica parte 3	28
Figura 13- Interface gráfica parte 4	29
Figura 14- Fluxograma do cálculo do fluxo de potência.....	30
Figura 15- Caso 1 (potência constante)	31
Figura 16- Caso 2 (carga ZIP)	32
Figura 17- Variação da frequência	33
Figura 18- Caso 3 (ZIP + frequência).....	34
Figura 19- Comportamento das tenções	34

LISTA DE TABELAS E QUADRO

Tabela 1 – Parametros do sistema	24
Quadros 2 – Casos analisados	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PPGCom	Programa de Pós-Graduação em Comunicação e Sociedade
UFT	Universidade Federal do Tocantins
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LKC	Leis de kirchhoff das correntes
LTK	A Lei de Kirchhoff das tensões
Freq.	Frequência

LISTA DE SÍMBOLOS

Pm	Potência mecânica
Pe	Potência elétrica
H	Constante de inércia
ω_s	Velocidade síncrona
ω	Velocidade do eixo
P(t)	Demanda no tempo t
Pnom	Potência nominal da carga
Vnom	Tensão nominal da carga
V(t)	Tensão aplicada na carga no tempo t
k0	Parcela da carga que não depende da tensão
k1	Parcela da carga que varia linearmente com tensão
k2	Parcela da carga que varia gradativamente com tensão
Hz	Unidade de medida de frequência
ZIP	Carga de Impedância, Corrente, Potência constantes
p.u	Por unidade
kp	sensibilidade com a frequência
A0	carga 100% de impedância constante (parte ativa)
A1	Porcentagem de impedância constante (parte ativa)
A2	Porcentagem de corrente constante (parte ativa)
B0	carga 100% de impedância constante (parte reativa)
B1	Porcentagem de impedância constante (parte reativa)
B2	Porcentagem de corrente constante (parte reativa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problema de pesquisa	12
1.1.1	Delimitação de escopo.....	12
1.1.2	Justificativa.....	12
1.2	Objetivos.....	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
1.3	Levantamento teórico	13
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	METODOLOGIA.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	Variação de frequência.	16
3.2	Fluxo de potência voltado para redes radiais.	18
3.3	Modelagem estática de cargas	21
3.3.1	Modelos estático de carga.....	21
4	DADOS TEORICOS.....	23
4.1	Estudo a ser aplicado.	24
5	PROGRAMAÇÃO EM PYTHON.....	25
5.1	Interface gráfica.....	26
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.	31
6.1	Caso 1.	32
6.2	Caso 2.	33
6.3	Caso 3.	34
6.4	Comportamento da tensão perante a variação das frequências.	35
7	CONCLUSÃO.....	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Na rede de distribuição um dos parâmetros importantes é o fluxo de potência que pode ser chamado de fluxo de carga, fornece aos engenheiros responsáveis importantes informações que refletem o funcionamento da rede de distribuição como tensões nas barras, correntes nos ramos, perdas técnicas e os fluxos de potência ativa e reativa nos alimentadores da rede, (HEBLING, 2018).

Há dois tipos de redes de distribuição de energia, as redes as malhadas, e as redes radiais onde ambas possuem características diferentes assim necessitando de métodos diferentes para o cálculo do fluxo de potência. Os métodos convencionais de cálculo de fluxo de potência em redes de transmissão, tais como os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado Rápido, não apresentam desempenho adequado no caso de redes de distribuição radiais, os métodos eficientes para solução do problema de fluxo de potência em redes de distribuição radiais são, soma de correntes que tem a formulação em termos de correntes, e o método da soma de potências que possui formulação tendo base as potencias nas barras do sistema. (COE 751 Análise de Redes Elétricas).

Como os sistemas de redes de distribuição são em sua maioria sistemas grandes necessitando o uso de recursos computacionais para os cálculos afim de evitar erros humanos nos cálculos, para utilizar os recursos computacionais é necessário fazer o a modelagem do sistema, a modelagem matemática deve descrever bem o sistema, deve atender a um propósito e ser encarado com uma descrição boa e confiável de aspectos específicos do sistema e não como a descrição final e insofismável do mesmo, no caso deste trabalho será utilizado o modelo ZIP pois o mesmo representa bem o sistema radial.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o fluxo de potência de uma rede de distribuição levando em consideração a variação na frequência fundamental, será utilizado modelos estáticos e o programa IEEE 33 barras para obter as simulações.

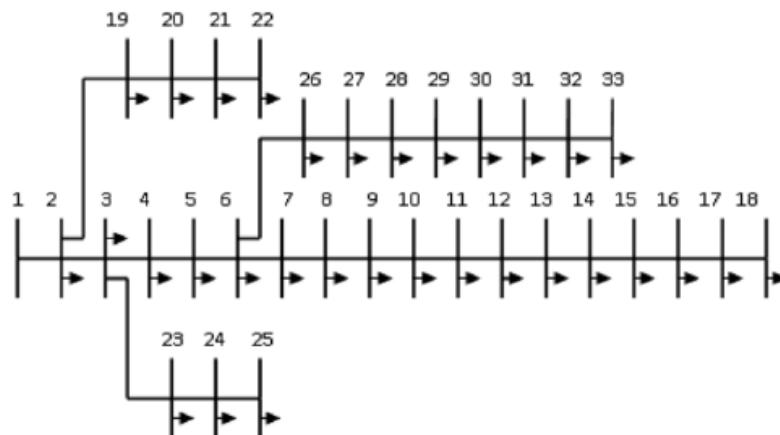
1.1 Problema de pesquisa

1.1.1 Delimitação de Escopo

Neste trabalho será retratado apenas a frequência fundamental, ou seja, é a frequência para qual o sistema foi projetado no caso do Brasil é 60Hz.

Será adotado o sistema IEEE 33 barras, consiste em uma rede radial pois este sistema tem mais impacto para o tema proposto, possuindo um total de 33 barras e já possuindo os dados de cada barra como resistência, impedância, potência entre outros parâmetros, Figura (1) a seguir mostra a rede radial proposta.

Figura 1: Sistema IEEE 33 barras.



1.1.2 Justificativa

Sabe-se que na ocorrência de faltas na rede elétrica, é comum haver uma queda de tensão momentânea em determinadas barras, e como o compressor tem baixa inércia, a rotação diminui. Quando a falta é eliminada e a tensão de alimentação é restaurada, uma “nova partida” é dada no compressor, havendo assim aumento de corrente, que por sua vez faz com que as tensões nas barras sejam reduzidas novamente (WILLIAMS; SCHMUS; DAWSON, 1992)

1.2 Objetivos

Aplicar modelos estáticos de cargas em regime transitório, porém porem variando apenas a frequência, a análise será feita no programa IEEE 33 barras.

1.2.1 Objetivo geral

Análise de uma rede de distribuição perante a variação da frequência fundamental.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Análise de modelos de cargas estáticos que consideram a variação da frequência fundamental do sistema.
2. Comportamento das tensões nas barras perante a variação da frequência fundamental em um sistema de distribuição.

1.3 Levantamento teórico

O levantamento teórico proposto para este trabalho de conclusão de curso será feito por meio de citações de outros autores relacionado ao tema proposto, ou seja, será feita através de artigos, publicações acadêmicas, monografias. afim de buscar informações o mais confiáveis possível, após o levantamento será feito um aglomerado de citações montando assim a estrutura deste trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

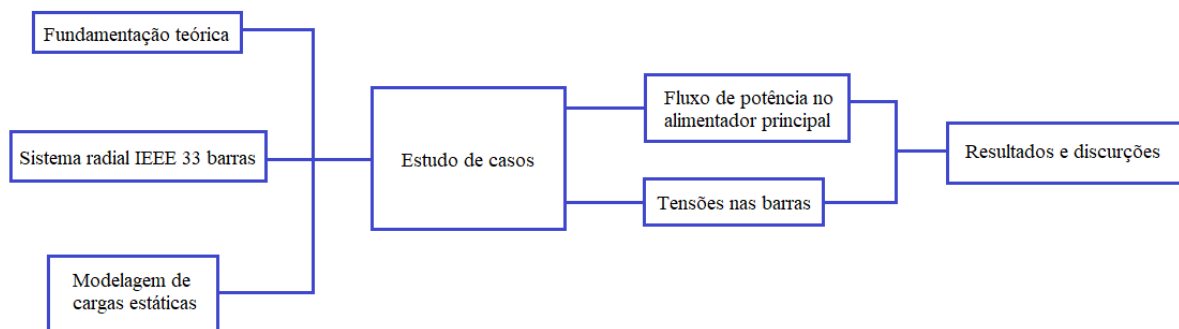
Este trabalho será dividido em etapas que serão descritas a seguir.

1. Parte introdutória onde se dá o início falando brevemente sobre o tema proposto, nesta parte se encontra a introdução, problema de pesquisa, delimitação do escopo, objetivos gerais e específicos a serem abordados.
2. Metodologia, onde tenta-se ilustrar de forma simplificada os métodos a serem aplicados ao decorrer da dissertação.
3. Fundamentação teórica, é onde se encontra a abordagem teórica do tema proposto, tentando esclarecer de forma sucinta o que é apresentado nos objetivos, nesta seção se encontra a fundamentação teórica, variação da frequência, fluxo de potência para redes radiais, modelagem de cargas estáticas, e dados teóricos.
4. Programação em python, nesta seção se encontra todas as modificações feitas no código, como as bibliotecas adicionadas, a interface gráfica, e os componentes presentes em cada janela da interface de usuário.
5. Resultados e discussão, neste capítulo é onde se encontra as configurações de cada caso a ser estudado, assim como os resultados obtidos através das configurações, é o capítulo onde se discute tentando explicar o que aconteceu com o sistema.
6. Conclusão, capítulo destinado a concluir o pensamento sobre os resultados obtidos nas análises e fazer o fechamento final do trabalho.

2 METODOLOGIA

Para mostrar a metodologia será feita a utilização de um fluxograma afim de facilitar o entendimento das etapas.

Figura 2: Fluxograma da metodologia a ser utilizada.



Fonte: Autor.

Ao ver o fluxograma vemos as etapas onde primeiramente temos a fundamentação teórica, a rede radial que será utilizada, modelagem de cargas estáticas, com esses conhecimentos pode-se começar o estudo de caso, que consiste em fazer uso dos dados dos sistemas e fazer a utilização de recursos computacionais para realizar as simulações, e por fim fazer uma discussão sobre os resultados obtidos, concluindo assim o trabalho.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em determinadas regiões a utilização de ar condicionado passa a ser algo praticamente indispensável, e o aumento na demanda deste eletrodoméstico é algo a ser considerado em um sistema principalmente em dias quentes. Pois os condicionadores de ar são basicamente compostos por um motor de indução acoplado a um compressor de ar, e este por sua vez tem uma baixa inércia, que dificulta a capacidade de manter a rotação dos motores em caso de perturbações, o que exige do sistema elétrico não apenas capacidade de atender a demanda, mas também meios de se recompor em caso de perturbações (SANHUEZA; FREITAS; MELO; MAXIMIANO SOBRINHO, 2021).

Sabe-se que na ocorrência de faltas na rede elétrica, é comum apresentar uma queda de tensão momentânea em determinadas barras, e pelo compressor possuir uma baixa inércia, a rotação diminui. No momento em que a falta é eliminada e a tensão de alimentação é reestabelecida, o compressor dá uma nova partida, provocando assim aumento de corrente, ocasionando uma nova queda de tensão nas barras (WILLIAMS; SCHMUS; DAWSON, 1992).

Tendo em vista esta situação um projeto no estado australiano de New South Wales estima um percentual ideal para este tipo de aparelho e o projeto estima em 9% na atualidade, (MALIK et al., 2019).

3.1 Variação de frequência.

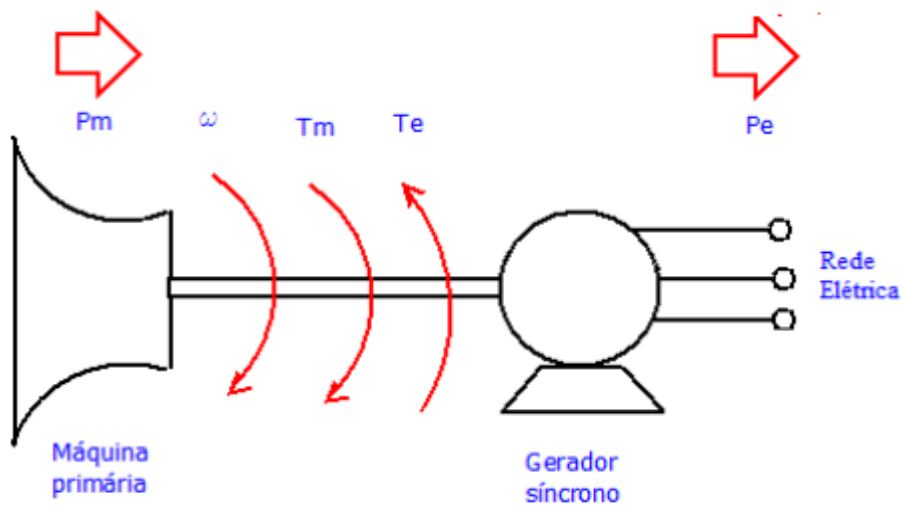
As variações de frequência podem ser definidas como qualquer desvio no valor de referência da frequência da energia elétrica. No caso do Brasil a frequência base é dada por 60Hz. As variações podem surgir por um desequilíbrio entre os níveis de potência de geração e demanda. A duração típica de uma variação de frequência é menor que dez segundos, (MAIA, 2011).

A regulamentação da qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica estipulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é apresentada no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional – PRODIST, (MARQUES, 2018).

De acordo com o modulo 8 do PRODIST a operação em regime permanente em condições normais deve apresentar uma frequência de 59,5 Hz a 60,5 Hz. As instalações geradoras devem garantir o retorno da frequência a sua condição normal, no intervalo de tempo de 30(trinta) segundos após a transgressão.

Se um gerador acoplado a uma turbina, onde é mostrada a potência mecânica P_m na entrada da turbina e a potência elétrica P_e na saída do gerador.

Figura 3: gerador acoplado a uma turbina.



Fonte: (SANHUEZA; FREITAS; MELO; MAXIMIANO SOBRINHO, 2021).

Com isso temos a Equação (1).

$$P_m - P_e = \frac{2h}{\omega_s} \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (1)$$

Onde:

P_m : Potência mecânica;

P_e : Potência elétrica;

H : Constante de inércia;

ω_s : Velocidade síncrona

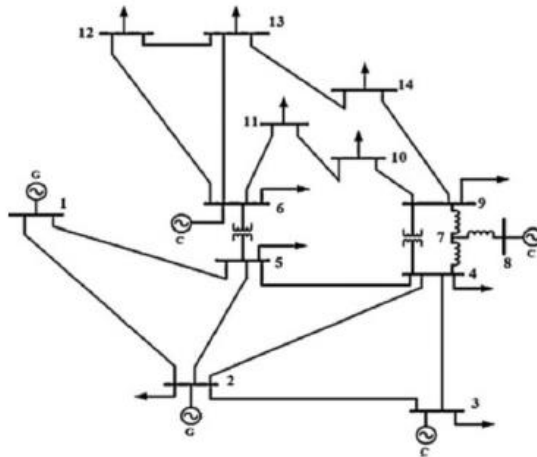
ω : Velocidade do eixo

Analisando a Equação (1), a velocidade de rotação do eixo do gerador ω só é constante quando as potências elétrica e mecânica são iguais, visto que a derivada de uma constante é nula. Sendo assim, pode-se afirmar que a frequência da onda senoidal é constante quando existe equilíbrio entre P_m e P_e . Logo, dependendo de determinadas ocorrências tais como perda de geração, perda de carga, perda de linha etc., podem ocasionar variações na frequência, (SANHUEZA; FREITAS; MELO; MAXIMIANO SOBRINHO, 2021).

3.2 Fluxo de potência voltado para redes radiais.

Antes de descrever os algoritmos de fluxo de potência voltados para redes radiais é necessário saber a diferença entre uma rede anel e uma rede radial. A primeira é destinada ao setor da transmissão e por isso quanto mais interligações tiver (malhas) maior é a sua confiabilidade que é o Sistema IEEE de 14 barras visto na Figura (4) abaixo (BARBOSA,2018).

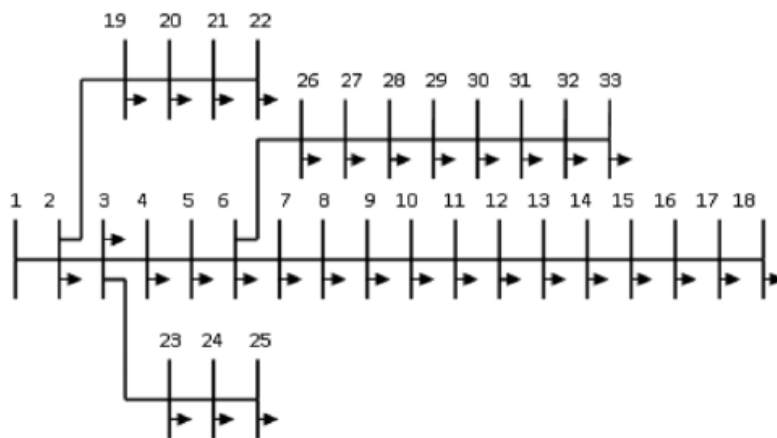
Figura 4: Sistema de rede malhada IEEE 14 barras.



Fonte: (BARBOSA, 2018).

Já as redes radiais (ou fracamente malhadas) são voltadas para o setor de distribuição e visam fazer a entrega da energia elétrica ao consumidor final. Um exemplo deste tipo de rede é o Sistema de 33 barras do IEEE mostrado a Figura (5) abaixo.

Figura 5: Sistema rede radial IEEE 33 barras.



Fonte: Sistema de 33 barras do IEEE. Fonte: (IEEE, 2014).

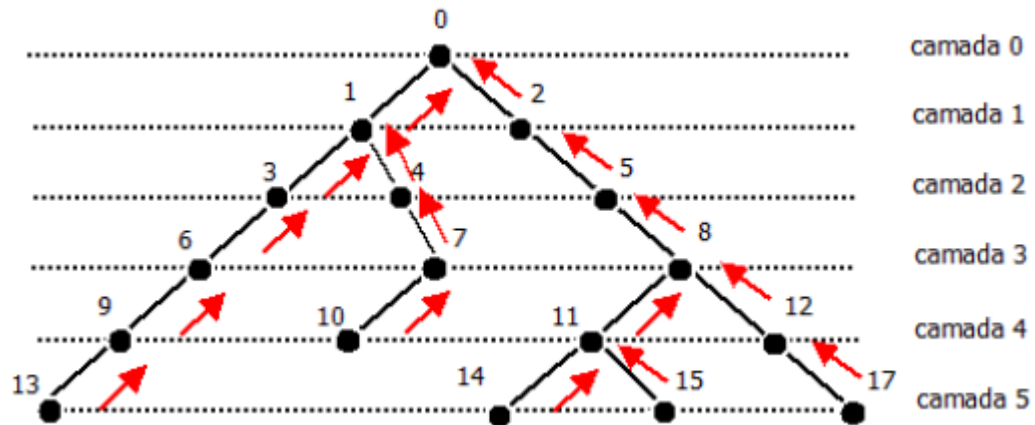
O Método de Newton adaptou-se muito bem para o setor de transmissão de energia elétrica onde as redes são malhadas e as tensões elevadas e por isso ao longo do tempo o método passou por diversas melhorias. Ao contrário, o setor da distribuição, onde as são radiais, ficou prejudicado, pois o método de Newton não tem boa convergência neste tipo de rede porque a relação X/R dos ramos é baixa e também porque a matriz admitância é mal escalonada, dificultando a inversão da mesma. (apostila da disciplina sistemas elétricos de potência (SANHUEZA; FREITAS, 2020).

Para os sistemas radiais será utilizado o método de soma de potencias, por ser aquele que tem apresentado melhores resultados para redes de distribuição radiais em termos de precisão dos resultados, tempo total de computação e facilidade de modelagem dos componentes do sistema de distribuição, (COPPE/UFRJ, COE 751).

O MSP começa após a etapa de pré-processamento, que é feita pelo algoritmo de Busca em Largura. O usuário fornece como entradas tabelas de subestações, de barras e ramos. A próxima etapa consiste em converter os dados de entrada em uma rede formada exclusivamente por subestações e trechos. Para isso, são criados 2 vetores, energizados e Desenergizados, para dá apoio no processo de implementação. O algoritmo de Busca em Largura é descrito a seguir:

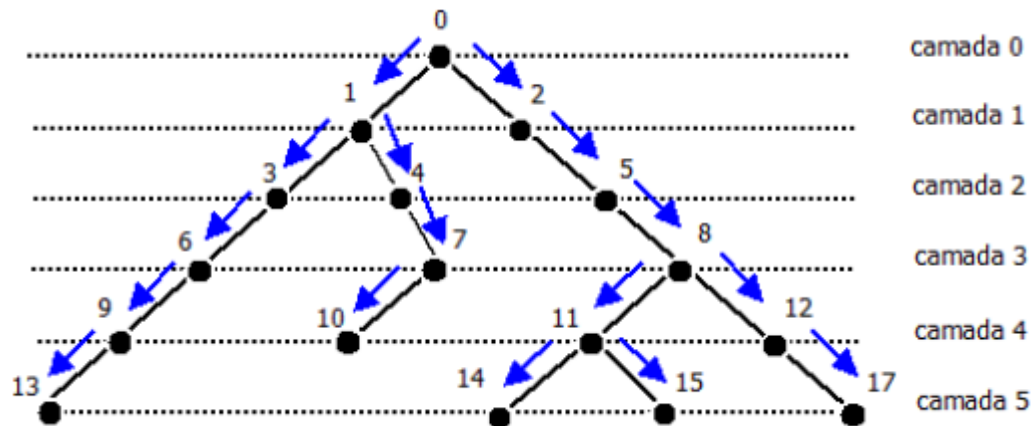
1. Inicialmente, só quem está energizada é a subestação. Pega o 1o elemento do vetor Energizados, ou seja, o atual;
2. Obtém todos os ramos conectados em atual. Se não houver nenhum ramo, pula para passo 5;
3. Obtém todos os elementos do vetor Desenergizados, ou seja, as barras, adjacentes a atual;
4. Para cada barra obtida em 3, se constar em Desenergizados, adiciona na tabela de trechos da seguinte forma: trecho atual → adjacente. Depois, move o elemento para o vetor Energizados e retira o ramo associado da tabela de ramos. Se não constar em Desenergizado, acusa que a rede é não radial.
5. Exclui atual da lista de energizados e volta para o passo 1 enquanto energizados não estiver vazio, (TÓRRES, 2016).

Figura 6: Rede radial genérica mostrando a varredura a frente (*forward sweep*).



Fonte: SANHUEZA; 2020

Figura 7: Rede radial genérica mostrando a varredura reversa (*backward sweep*).



Fonte: SANHUEZA; FREITAS, 2020

A primeira etapa (*forward sweep*) do Método das Somas de Potências é ilustrada pela Figura 3 fazendo a soma das potências (setas vermelhas) pela LCK, partindo da camada mais profunda, neste caso a 5, até a camada superior, que neste caso é a 0.

É atribuído que todas as barras têm a tensão da barra fonte.

Formula da potência acumulada mostrado na Equação (2):

$$s_i = s_l + \sum s_k + \sum s_{k_l} \quad (2)$$

Onde:

S_i : Potência complexa total na barra i ;

S_L : Potência de carga na barra i ;

$\sum S_k$: Soma das cargas das barras a jusante da barra i ;

$\sum S_{k_l}$: Soma das perdas nos ramos a jusante da barra i .

Já a segunda etapa (*backward sweep*) consiste em aplicar a LTK, desde a barra de origem (barra 0) em direção às barras mais distantes, para calcular as respectivas tensões. Este processo é ilustrado na Figura (7) através das setas azuis. De posse das novas tensões calculadas para cada barra é necessário saber se houve a convergência. Esta ocorre quando a diferença entre as tensões novas e atribuídas (erro) é menor que uma tolerância pré-estabelecida, por exemplo, um milésimo (0,001).

O erro é calculado pela Formula (3):

$$erro = \left| v^k - v^{k+1} \right| \quad (3)$$

Trata-se do calculo do erro absoluto pois para as análises precisam do modulo do erro.

O algoritmo fica em loop até que o resultado seja menor que o erro estipulado assim o processo é interrompido caso contrário é necessário fazer um novo (*forward sweep*) e (*backward sweep*)

3.3 Modelagem estática de cargas

Um modelo matemático de um sistema deve atender a um propósito e ser encarado com uma descrição boa e confiável de aspectos específicos do sistema e não como a descrição final e insofismável do mesmo. Se o fenômeno a ser modelado for de natureza não linear, este pode ser descrito por um modelo linear, (PUC-RIO, CERTIFICAÇÃO DIGITAL N°0812713/CA).

3.3.1 Modelos estático de carga.

Embora a modelagem estática de cargas não represente com fidelidade o comportamento físico das mesmas, tem a vantagem de um tempo de simulação menor. E isto vem a ser conveniente, pois nem sempre são necessárias todas as informações de todas as variáveis de uma carga, (SANHUEZA; FREITAS; MELO; MAXIMIANO SOBRINHO, 2021).

São modelos que expressam as potências ativa e reativa, em qualquer instante do tempo, em função da magnitude de tensão do barramento de carga e da frequência elétrica do sistema, naquele instante. Quando ocorrem variações pequenas ou lentas de tensão e/ou frequência, o sistema retorna ao regime permanente rapidamente, e nestes casos é possível modelar a carga por modelos estáticos sem perda de generalidade, (PUC-RIO, CERTIFICAÇÃO DIGITAL N°0812713/CA).

O modelo mais conhecido para caracterizar o comportamento estático de cargas, largamente empregado em estudos de fluxo de potência e de estabilidade de tensão, é o modelo ZIP que é um modelo de impedância, corrente e potência, (PUC-RIO, CERTIFICAÇÃO DIGITAL N°0812713/CA).

O modelo ZIP é dado pela Equação (4) abaixo:

$$P(t) = P_{nom} \left[k_0 + k_1 \frac{v(t)}{v_{nom}} + k_2 \left(\frac{v(t)}{v_{nom}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Onde:

P(t): Demanda no tempo t;

P_{nom}: Potência nominal da carga;

V_{nom}: Tensão nominal da carga;

V(t): Tensão aplicada na carga no tempo t;

k₀: Parcela da carga que não depende da tensão;

k₁: Parcela da carga que varia linearmente com tensão;

k₂: Parcela da carga que varia gradativamente com tensão

Afim de reduzir e simplificar, o segundo membro da Equação (4) será chamado de PZIP.

Para acrescentar o efeito da variação da frequência no comportamento da carga é acrescentado o fator mostrado na Equação (5).

$$fator = \left(1 + k_p \frac{f(t) - f(0)}{f(0)} \right) \quad (5)$$

Onde:

f(t): frequência nova

f(0): frequência anterior

k_p: Fator de sensibilidade com a frequência

Multiplicando a equação 5 por PZIP temos a Equação (6):

$$P(t) = PZIP \left(1 + k_p \frac{f(t) - f(0)}{f(0)} \right) \quad (6)$$

3.4 Dados teóricos.

Como já citado será utilizado o sistema 33 barras do IEEE que constituem um sistema de distribuição radial, os parâmetros das barras a serem utilizados neste trabalho serão listados na Tabela (1) abaixo.

Tabela 1: Parâmetros do sistema.

Ramo	Barra Transmissora	Barra Receptora	R [Ω]	XL [Ω]	Carga na barra receptora	
					P (kW)	Q (kvar)
1	1	2	0,0922	0,047	100	60
2	2	3	0,493	0,2511	90	40
3	3	4	0,366	0,1864	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	60	30
5	5	6	0,819	0,707	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	7	8	0,7114	0,2351	200	100
8	8	9	1,03	0,74	60	20
9	9	10	1,044	0,74	60	20
10	10	11	0,1966	0,065	45	30
11	11	12	0,3744	0,1298	60	35
12	12	13	1,468	1,155	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	14	15	0,591	0,526	60	10
15	15	16	0,7463	0,545	60	20
16	16	17	1,289	1,721	60	20
17	17	18	0,732	0,574	90	40
18	2	19	0,164	0,1565	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	90	50
23	23	24	0,898	0,7091	420	200
24	24	25	0,896	0,7011	420	200
25	6	26	0,203	0,1034	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,059	0,9337	60	20
28	28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	30	31	0,9744	0,963	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	32	33	0,341	0,5302	60	40

3.5 Estudo a ser aplicado.

Para a análise o estudo será dividido em 5 etapas cada etapa corresponde a um comportamento diferente da rede elétrica, o Quadro (1) a seguir mostra a diferença de cada cenário e a composição da carga.

Quadro 1: Casos analisados.

Casos	Descrição
1	Potência constante
2	ZIP
3	ZIP + Variação da frequência

No caso 1 a rede de distribuição será simulada considerando a carga de a cordo com o PRODIST modulo 2, já no caso 2 trata-se da composição da carga ZIP, na parte ativa foi adotado o valor de 78% de corrente constante e 22% de impedância constante, e a parte reativa e composto por 100% de impedância constante.

O caso de número 3 (Três) e contemplado pelo modelo ZIP somado com a variação da frequência fundamental, este é o modelo visto na equação (6).

4 PROGRAMAÇÃO EM LINGUEAGEM PYTHON.

A partir de um código já pronto e disponibilizado pelo professor orientador, foi feito algumas alterações com o objetivo de facilitar o manuseio e organização do mesmo.

Na versão original apresenta a tabela com os dados tanto das barras quanto das linhas no meio do código, com isto tem em mente que caso necessite fazer alguma alteração ou adição nos dados forçaria o usuário a fazer a alteração diretamente na programação, aumentando o risco de erros indesejados, a Figura (8) a seguir mostram as tabelas que estavam presentes dentro do código.

Figura 8: Tabelas no código original.

barra	camada	P	Q	Linha	De	Para	R	X	Bsh	theta
0	0	0	0	0	0	1	0.0922	0.047	0	0
1	1	100	60	1	1	2	0.493	0.2511	0	0
2	2	90	40	2	2	3	0.366	0.1864	0	0
3	3	120	80	3	3	4	0.3811	0.1941	0	0
4	4	60	30	4	4	5	0.819	0.707	0	0
5	5	60	20	5	5	6	0.1872	0.6188	0	0
6	6	200	100	6	6	7	0.7114	0.2351	0	0
7	7	200	100	7	7	8	1.03	0.74	0	0
8	8	60	20	8	8	9	1.044	0.74	0	0
9	9	60	20	9	9	10	0.1966	0.065	0	0
10	10	45	30	10	10	11	0.3744	0.1298	0	0
11	11	60	35	11	11	12	1.468	1.155	0	0
12	12	60	35	12	12	13	0.5416	0.7129	0	0
13	13	120	80	13	13	14	0.591	0.526	0	0
14	14	60	10	14	14	15	0.7463	0.545	0	0
15	15	60	20	15	15	16	1.289	1.721	0	0
16	16	60	20	16	16	17	0.723	0.574	0	0
17	17	90	40	17	1	18	0.164	0.1565	0	0
18	2	90	40	18	18	19	1.5042	1.3554	0	0
19	3	90	40	19	19	20	0.4095	0.4784	0	0
20	4	90	40	20	20	21	0.7089	0.9337	0	0
21	5	90	40	21	2	22	0.4512	0.3083	0	0
22	3	90	50	22	22	23	0.898	0.7091	0	0
23	4	420	200	23	23	24	0.896	0.7011	0	0
24	5	420	200	24	5	25	0.203	0.1034	0	0
25	6	60	25	25	25	26	0.2842	0.1447	0	0
26	7	60	25	26	26	27	1.059	0.9337	0	0
27	8	60	20	27	27	28	0.8042	0.7006	0	0
28	9	120	70	28	28	29	0.5075	0.2585	0	0
29	10	200	600	29	29	30	0.9744	0.963	0	0
30	11	150	70	30	30	31	0.3105	0.3619	0	0
31	12	210	100	31	31	32	0.341	0.5302	0	0
32	13	60	40	32	32					

Fonte:IDE Python.

Para reduzir o número de linhas no código e também organizar, foi adicionado uma nova biblioteca chamada Panda, esta biblioteca tem uma função muito útil e que foi utilizada, que é chamar um arquivo em .xlsx (formato utilizado pelo Excel) em determinado ponto da execução da programação, tendo esses documentos .xlsx facilita o manuseio pois caso seja necessário alterar os dados basta alterar no arquivo do Excel, não necessitando alterar algo no código, a Figura (9) abaixo ilustra a alteração feita.

Figura 9: Alteração no código.

```
# Leitura dos dados salvos em excel
barras = np.array(pd.read_excel("barras.xlsx", index_col=0))
linhas = np.array(pd.read_excel("linhas.xlsx", index_col=0))
```

Fonte: *Pycharm*.

Como pode-se ver na figura, com a utilização da biblioteca panda, cujo a abreviação se dá por **pd**, toda aquela tabela do código original se transformou em apenas duas linhas.

4.1 Interface gráfica.

Com o intuito de facilitar ainda mais o manuseio e também manter o código o mais intocável possível será feito uma interface gráfica, onde possibilita o usuário alterar os parâmetros da modelagem de carga tanto na parte ativa quanto na parte reativa, com isso evitando que tenham que tenha a necessidade de alterar algo diretamente nas linhas de programação. Para implementar a interface será necessário fazer a instalação de uma nova biblioteca chamada KIVY.

(KIVY, 2021) A biblioteca KIVY é uma ferramenta multiplataforma, ou seja, é compatível com diversas plataformas (Android, Windows, IOS, OSX), e também uma das mais completas para realização de interface gráfica, ela possui sua própria filosofia que se pode resumir em poucas palavras chaves “moderna, rápida, flexível, focada, e comunidade gratuita”.

A linguagem KV, comumente chamada de kvleng ou ate linguagem kivy, permite que o programador crie sua árvore de *widgets* de forma declarativa vinculando propriedades de *widgets* umas às outras ou a retornos de chamada de maneira natural. Permite protótipos muito rápidos e

mudanças ágeis em sua interface de usuário, facilitando a separação da lógica de seu aplicativo (KIVY, 2021)

A interface gráfica permite que se possa alterar dados específicos sem se preocupar em comprometer o código base, tornando mais seguro para o usuário utilizar sem que ocasione erros irreversíveis, abaixo temos a Figura (10) mostrando a primeira janela da interface.

Figura 10: Interface gráfica parte 1.



Fonte: Python, biblioteca KIVY.

Essa é a primeira aba referente a interface onde se tem a opção de prosseguir a nova aba e inserir os dados desejados, ou sair, ao clicar em sair a interface automaticamente se fecha, a seguir temos a Figura (11) mostrando a segunda janela, janela onde o usuário interage adicionando os dados da parte ativa do modelo de carga.

Figura 11: Interface gráfica parte 2.

Insira Os Valores Das Constantes

CONSTANTES

Máximo de interações 50

Fator de sensibilidade (kp) 0.9

PARTE ATIVA

A0 (100% Impedancia) 0

A1 (Impedancia %) 0.22

A2 (Corrente %) 0.78

Fonte: Python, biblioteca KIVY.

Já nesta segunda aba é onde o usuário deve preencher com os dados de seu sistema, definindo valores importantes, como número máximo de interações, fator de sensibilidade com a frequência, e os valores desejados na modelagem da carga estática, onde para a parte ativa são nomeadas como A0, A1, A2, abaixo temos a Figura (12) onde é adicionado os dados da parte reativa da carga.

Figura 12: Interface gráfica parte 3.

PARTE REATIVA

B0 (100% Impedancia) 1

B1 (Impedancia %) 0

B2 (Corrente %) 0

Calcular

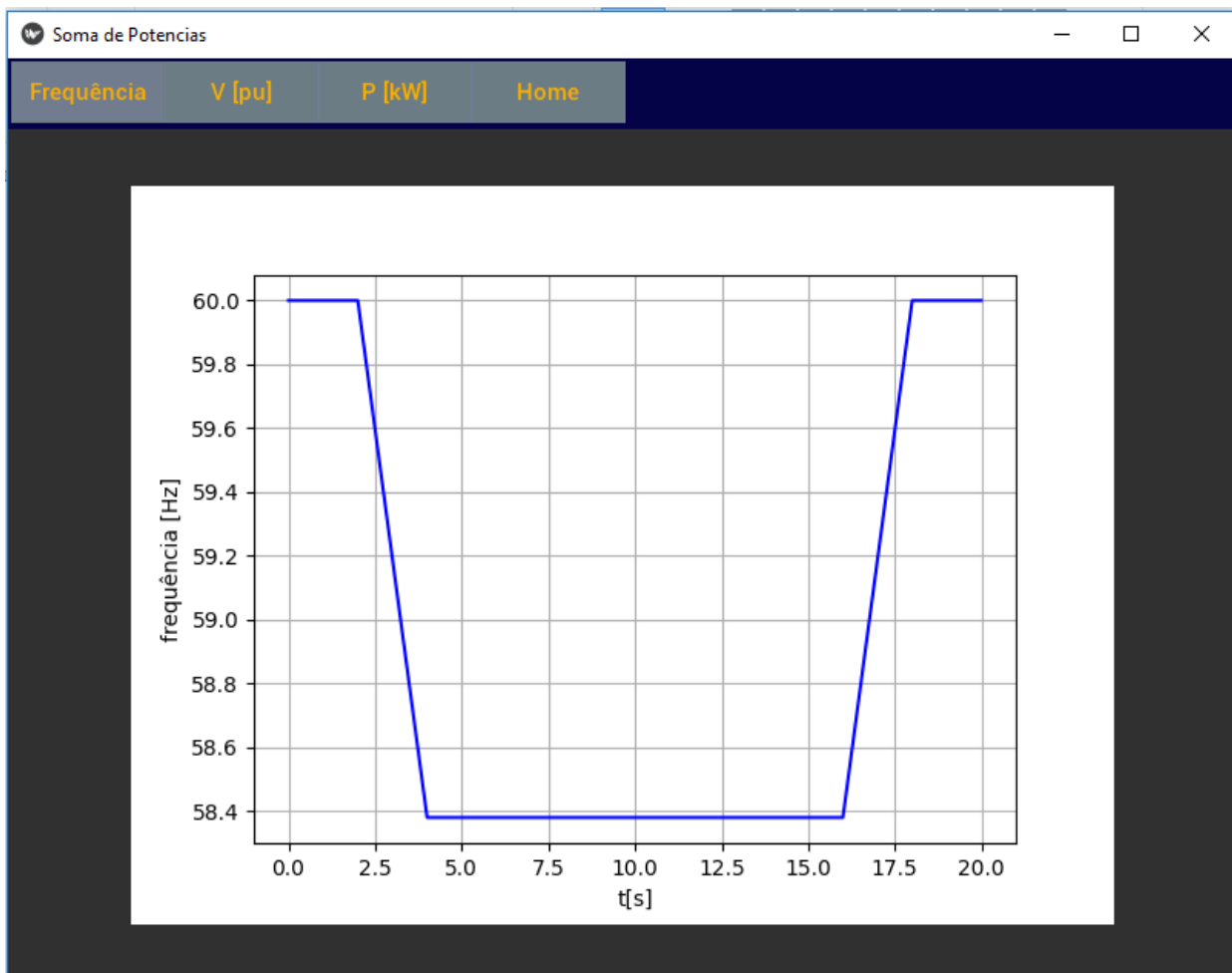
Voltar

Fonte: Python, biblioteca KIVY

Ainda na segunda aba da interface logo a baixo da parte ativa se encontra os campos destinados a parte reativa da modelagem de carga, este são nomeados como B0, B1, B2.

Logo após se colocar todos os dados, temos o botão calcular, onde ao ser selecionado a interface chama o arquivo onde com o código da soma de potência e o executa substituindo os valores (máximo de interações, sensibilidade com a frequência, A0, A1, A2, B0, B1, B2) no código original, o executando normalmente, após esperar alguns segundo que é o tempo necessário para que a execução se conclua abrirá uma nova aba da interface de usuário, a seguir temos a Figura (13) que mostra a última janela da interface, esta e destinado os resultados.

Figura 13: Interface gráfica parte 4.



Fonte: Python, biblioteca KIVY

Está é a aba destinada a demonstrar o resultado da simulação, nesta aba temos as opções de ver o gráfico da frequência, tensão, e demanda, também temos o Botão home que ao ser selecionado a interface gráfica volta a aba inicial.

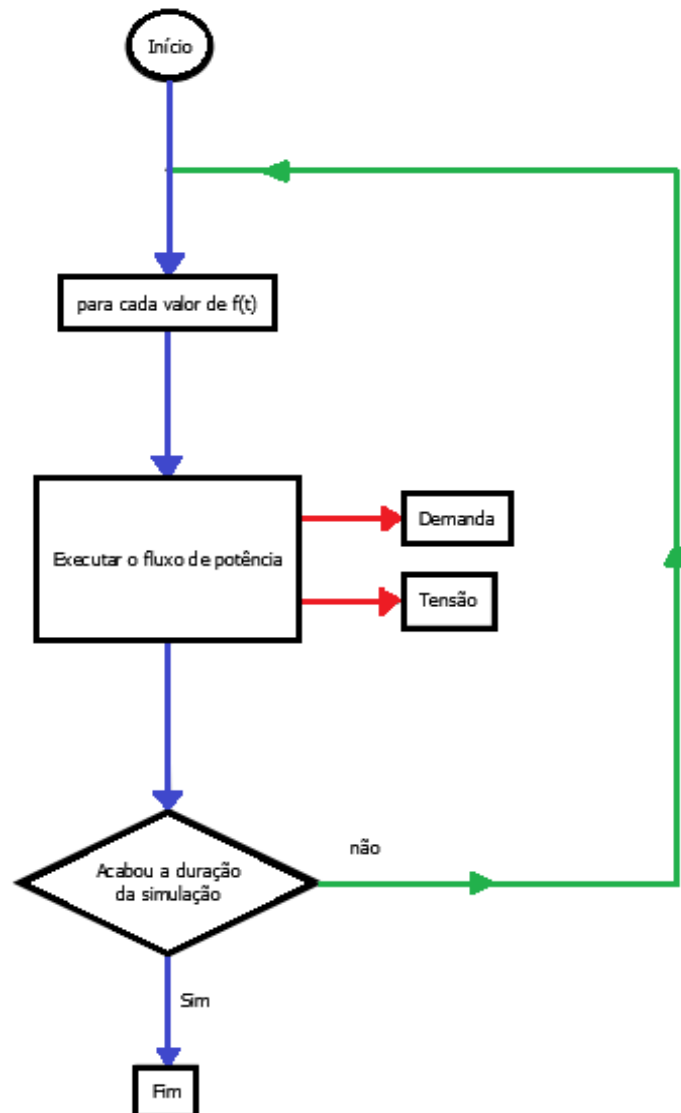
É importante ressaltar que mesmo que o gráfico da frequência apareça em todas as simulações o que faz com que esta frequência interfira nos outros gráficos é a sensibilidade com a frequência k_p , se k_p for 0 (zero) a frequência não altera nos gráficos das tensões e demanda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Para se obter os resultados foi utilizado o método soma de potência utilizando a linguagem de programação Python para fazer as interações, e os dados citados no capítulo anterior.

Por se tratar de uma carga estática para a realização da análise será adotado um intervalo de tempo respectivamente curto, o tempo será de 20s (segundos), fazendo uso de um máximo de 50 interações ao longo do tempo, abaixo temos a Figura (14) que mostra de forma simplória o funcionamento do código no cálculo do fluxo de potência .

Figura 14: Fluxograma do cálculo do fluxo de potência.



5.1 Caso 1.

Para o caso 1 (um) que se trata da potência constante, ou seja, não depende da frequência e nem das tensões.

Caso 1: Tem a seguinte configuração:

$$A0 = 1$$

$$A1 = 0$$

$$A2 = 0$$

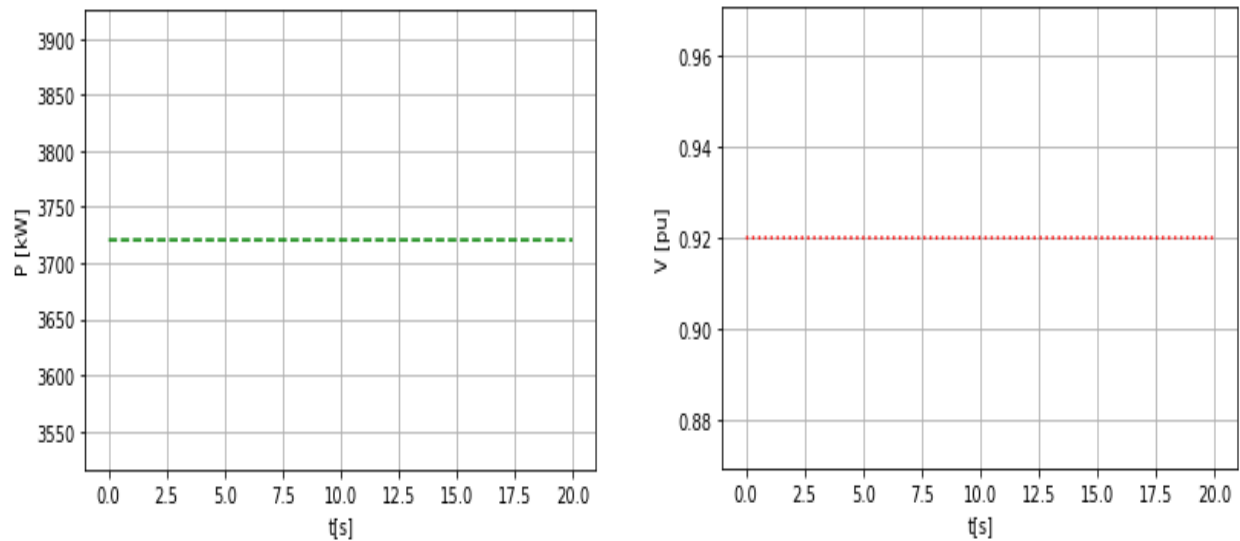
$$B0 = 1$$

$$B1 = 0$$

$$B2 = 0$$

$$Kp = 0$$

Figura 15: Caso 1 (potência constante).



Fonte: Biblioteca matplotlib Python.

Por ser potência constante o resultado é justamente uma linha reta não sofrendo alterações ao longo da execução da programação, para este caso a demanda foi de aproximadamente de 3730 kw.

5.2 Caso 2.

Já no caso 2 se trata da análise com a modelagem de carga estática ZIP onde é adotada para a parte ativa, 78% de corrente constante e 22% de impedância constante, já na parte reativa é adotado como 100% de impedância constante. Esta diferença deve-se ao fato de que a demanda nestas cargas varia linearmente com a tensão para a corrente constante, e quadraticamente com a tensão no caso de impedância constante.

Configuração do caso 2:

$$a_0 = 0$$

$$a_1 = 0.22$$

$$a_2 = 0.78$$

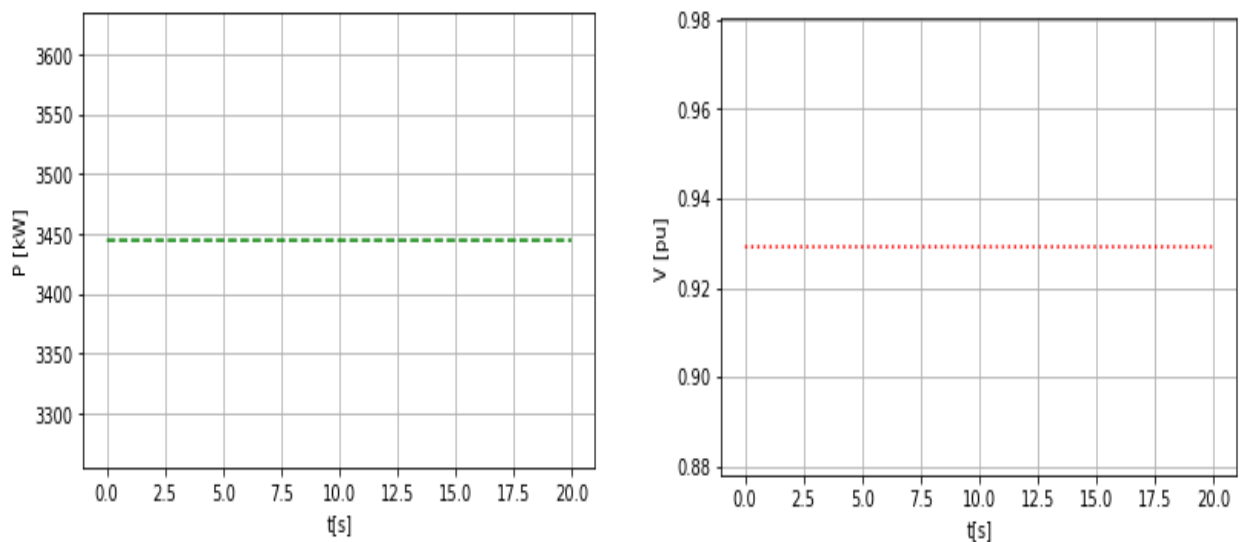
$$b_0 = 0$$

$$b_1 = 0$$

$$b_2 = 1$$

$$k_p = 0$$

Figura 16: Caso 2 (carga ZIP).



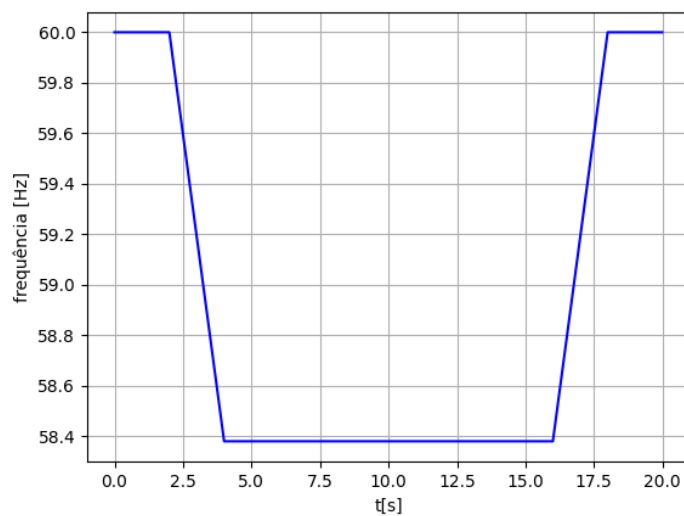
Fonte: Biblioteca matplotlib Python.

Por conta da carga modelada temos que a demanda sofre uma alteração, no caso teve-se uma alteração de aproximadamente 281 kw de diferença quando se comparado ao caso 1.

5.3 Caso 3.

A variação adotada é 58,4 Hz a 60 Hz pois se trata de um caso real analisada por Masood, Yan e Saha (2018), e que de acordo com a PRODIST modulo 8 se o sistema permanecer abaixo deste valor por mais de 10 (dez) segundos o sistema terá um corte de geração ou de carga afim de manter a frequência em uma faixa tolerável, a seguir vemos os gráficos obtidos.

Figura 17: Variação da frequência



Fonte: Biblioteca matplotlib Python.

Configuração para o caso 3:

$$a0 = 0$$

$$a1 = 0.22$$

$$a2 = 0.78$$

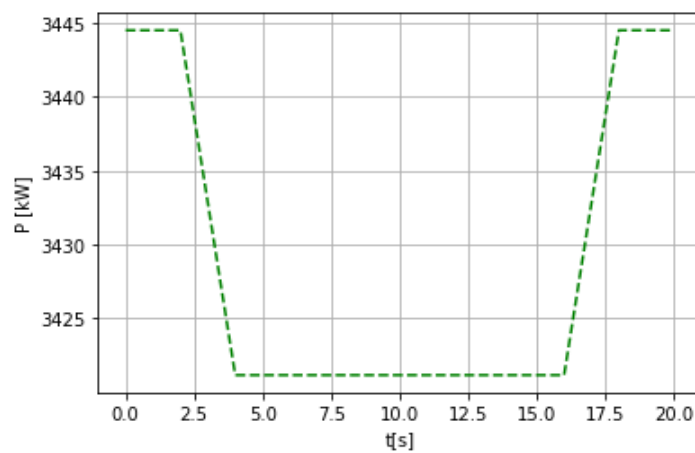
$$b0 = 0$$

$$b1 = 0$$

$$b2 = 1$$

$$kp = 0,9$$

Figura 18: Caso 3 (ZIP + frequência).



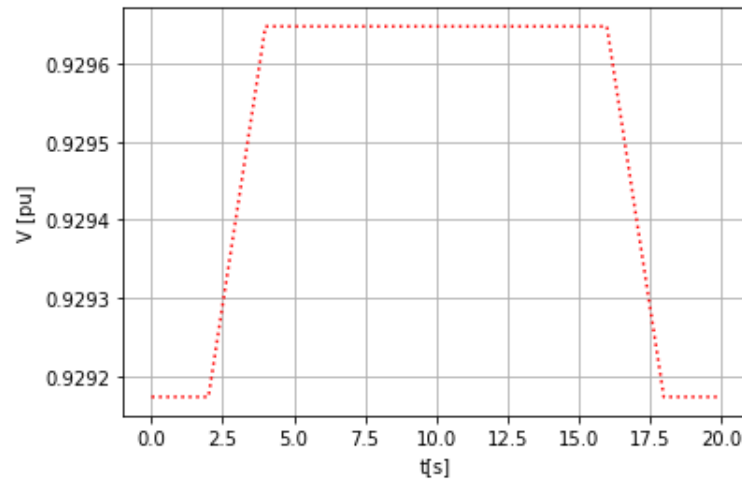
Fonte: Biblioteca matplotlib Python.

De acordo com que a frequência vem decaindo a demanda é diretamente proporcional, se vê que ao chegar a 58,4 Hz a demanda é de 3422 kw, teve respectivamente um decaimento aproximadamente de 22 kw em relação a demanda pra quando a rede opera na frequência fundamental.

5.4 Comportamento da tensão perante a variação das frequências.

Utilizando a mesma variação da frequência no caso 3, será feito a análise de como as tensões se comportam.

Figura 19: comportamento das tensões.



Fonte: Biblioteca matplotlib Python.

Nota-se que a tensão se eleva com o decair da frequência, ao analisar a equação (6) que se P_{zip} é a segunda parcela da equação (4), com isso temos que a equação (6) pode ser reescrita conforme a Equação (7):

$$P(t) = P_{nom} \left[k_0 + k_1 \frac{v(t)}{v_{nom}} + k_2 \left(\frac{v(t)}{v_{nom}} \right)^2 \right] * \left(1 + k_p \frac{f(t) - f(0)}{f(0)} \right) \quad (7)$$

A partir desta nova equação pode-se aferir que $V(t)$ e $f(t)$ são inversamente proporcionais, justificando assim o aumento da tensão enquanto a freq. decai neste caso a tensão aumentou em 0,045 p.u.

6 CONCLUSÃO.

Os estudos de casos apresentam parcelas que não dependem da frequência, caso 1, potência constante o mesmo apresentou uma demanda 281 kw maior que o caso 2 que é representado com a carga ZIP. É importante ressaltar que o modelo de potência constante recebe uma preferência na modelagem de acordo com a PRODIST modulo 2.

No caso 3, além de ter a modelagem de carga que dependem da tensão também se tem a variação da frequência, e a partir deste caso ainda foi analisado o comportamento das tensões, com isto pode notar que a demanda é diretamente proporcional a freq. e a tensão aplicada na carga é inversamente proporcional a demanda, o que é bem compreensível afinal quando a demanda é alta as tensões das redes tendem a sofrer afundamentos.

Ao adicionar a interface de usuário facilita muito o manuseio do programa pois a interface permite que até um leigo em linguagem de programação consiga fazer utilização do código obtendo os resultados que o mesmo necessita de forma confiável, sobre os dados do seu sistema, na programação foi adicionada também a opção de salvar as imagens do gráfico em uma pasta especificar onde o usuário pode acessar mesmo após fechar a interface.

Neste trabalho de conclusão de curso pode-se concluir que é de extrema importância fazer diversos tipos de análise nas redes de energia elétrica, para entender o comportamento das tensões, demanda, potencia, e não só da rede como também da carga a ser colocada na rede, por que como foi visto neste trabalho, para a rede funcione perfeitamente deve-se haver uma sincronia entre a potência mecânica (turbina geradora) e potência elétrica (carga instalada na rede).

REFERÊNCIAS

SANHUEZA; Sergio Manuel Rivera; FREITAS, Stefani Carolline Leal de; MELO, Maxwell Diógenes Bandeira de; MAXIMIANO SOBRINHO, Adelfício. **SIMULAÇÃO DO FLUXO DE CARGA EM UMA REDE ELÉTRICA REAL COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE CONDICIONADORES DE AR**. 2021. Revista SODEBRAS – Volume 16 N° 181. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N181.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2021.

MODELOS de Carga. PUC-RIO, CERTIFICAÇÃO DIGITAL N°0812713/CA. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16417/16417_3.PDF. Acesso em: 27 fev. 2021.

MAIA, Reinaldo Moreira. **Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia**. 2011. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/158M.PDF>. Acesso em: 26 fev. 2021.

TÔRRES, Anderson Alberto Pinto. **Método da Soma de Potências e de Newton para Solução do Fluxo de Carga em Redes de Distribuição com Geração Distribuída**. 2016. Disponível em: http://www.cear.ufpb.br/arquivos/cgee/TCC/TCC_-_Anderson_Alberto_-_versão_final.pdf. Acesso em: 03 mar. 2021.

MARQUES, Alex Fernando de Medeiros. **ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA FORNECIDA AO IFBA - CAMPUS DE PAULO AFONSO**. 2018. Disponível em: https://portal.ifba.edu.br/paulo-afonso/anexos/anexos-cursos/graduacao/Engenharia_Eletrica/TCC-EE/ano-2018/tcc-alex-marques-2018.pdf. Acesso em: 05 mar. 2021.

GARCIA, Flávio Resende. **HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. Disponível em: http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf. Acesso em: 05 mar. 2021.

VARIZ, Abilio Manuel *et al.* **Cálculo do fluxo de harmônicos em sistemas de potência trifásicos utilizando o método de injeção de correntes com solução iterativa**. 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000200007. Acesso em: 25 fev. 2021.

HEBLING, Gustavo Miranda. **Calculo de Fluxo de Potencia de Redes de Distribuição Malhadas**. 2018. Disponível em:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiL78ml7KbvAhXGK7kGHf0ZAx8QFjAAegQIAhAD&url=http%3A%2F%2Fwww.tcc.sc.usp.br%2Ftce%2Fdisponiveis%2F18%2F180500%2Ftce-26072018-115407%2Fpublico%2FHebling_Gustavo_tcc.pdf&usg=AOvVaw2WIZxTJ_uQ_rSX0yilaRlw. Acesso em: 26 fev. 2021.

BARBOSA, Augusto César de Castro; CARVALHAES, Cláudio Gonçalves; COSTA, Marcus Vinicius Tovar. A computação numérica como ferramenta para o professor de Física do Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 249-254, 01 abr. 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172006000200016&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 05 mar. 2021.

PROGRAMMING GUIDE. KIVY, 2021. Disponível em: <https://kivy.org/doc/stable/guide/lang.html>. Acesso em: 14, maio e 2021.