



Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Graduação em Engenharia Elétrica

**RAFAEL RIUL MANFRIN**

**IMPACTOS DA TROCA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NAS REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Uberlândia  
2021

**RAFAEL RIUL MANFRIN**

**IMPACTOS DA TROCA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NAS REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Rubens Macedo Junior

---

Assinatura do Orientador

Uberlândia  
2021

**RAFAEL RIUL MANFRIN**

**IMPACTOS DA TROCA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA NAS REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior

---

Prof. Dr. José Roberto Camacho

---

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim

Uberlândia  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Marlei e Nelson, pelo carinho e compreensão durante este tempo nada curto da minha vida.

Aos meus padrinhos, Marilda e Carmona, por me acolherem em Uberlândia como se fosse seus próprios filhos.

Aos Primos, Yuri, Erick e Alex, por me acolherem em Uberlândia como um irmão.

Aos amigos do Underground, amigos de minha cidade natal, que nunca perderam uma chance de fazer piada com a minha cara e nem por um minuto esqueceram a demora de minha graduação, vocês são os maiores canalhas que tive o prazer de conhecer e ter em minha vida.

Ao Professor Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior por toda a atenção e suporte para com este trabalho e durante a graduação.

Ao Professor Carlos Augusto Bissochi Junior, padrinho de formatura da turma, por todo o suporte durante a graduação e por várias histórias geradas durante esse tempo.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU por terem colaborado com a minha graduação, com sabedoria e dedicação.

Ao Diretório Acadêmico da Faculdade de Engenharia Elétrica, quase minha segunda casa, onde passei boa parte da minha graduação e onde pude dividir experiência com colegas do curso e aos amigos que fiz durante esse tempo.

E claro as melhores pessoas que tive o prazer de conhecer durante minha graduação, Cézio Wilson, Eder Lima, Thiago Amuy, Letícia Salomão, Raphael Teles (Pirata), Everton Dias (Quejinho), Letícia Bertagna, Gustavo Maciel, André Porto, Vinícius Ferreira (Kabessa), Miguel Freitas e Fellipe Barbosa (Rosca).

## RESUMO

Com o avanço da tecnologia no mundo surgem novos aparelhos elétricos e com as luminárias para iluminação pública não é diferente. Nas últimas décadas, ocorreram mudanças nos tipos de luminárias utilizadas na iluminação pública. Hoje pode se encontrar uma enorme variedade de modelos de luminárias. Atualmente, diversas cidades deram início ao processo de substituição das mesmas por tecnologia LED.

Mas quais efeitos adversos essa troca de luminárias causa no sistema de distribuição? O principal objetivo desse trabalho é apresentar o comportamento típico de uma rede de distribuição secundária de energia elétrica utilizando-se diferentes tecnologias de lâmpadas para iluminação pública, assim como as vantagens e desvantagens inerentes a cada uma das tecnologias analisadas.

Desse modo, por meio de simulações computacionais, utilizando-se do software Matlab®/Simulink, este trabalho procura demonstrar os impactos que cada uma dessas tecnologias, utilizadas nos sistemas de iluminação pública, tem para com a qualidade da energia elétrica na rede de distribuição secundária.

Palavras-chave: Iluminação Pública, Luminárias, Rede de Distribuição de Energia Elétrica.

## **ABSTRACT**

With the advancement of technology in the world, new electrical appliances emerge and lighting fixtures for public lighting are no different. In recent decades, there have been changes in the types of lamps used in street lighting. Today you can find a huge variety of lighting fixtures. Currently, several cities have started the process of replacing them with LED technology.

But what adverse effects does this change of lighting have on the distribution system? The main objective of this work is to present the typical behavior of a secondary electricity distribution network using different lamp technologies for public lighting, as well as the inherent advantages and disadvantages of each of the analyzed technologies.

Thus, through computer simulations, using Matlab® / Simulink software, this work seeks to demonstrate the impacts that each of these Technologies, used in public lighting systems, has on the quality of electricity in the secondary distribution network.

**Keywords:** Public Lighting, Lamps, Electricity Distribution Network.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distorções harmônicas individuais de corrente de uma lâmpada de vapor de sódio.....	15
Figura 2– Distorções harmônicas individuais de corrente de uma lâmpada de vapor metálico.....	15
Figura 3 Distorções harmônicas individuais de corrente de uma luminária de LED.....	16
Figura 4 Espectro harmônico de corrente.....	20
Figura 5 - Parâmetros da fonte de alimentação trifásica do sistema primário.....	21
Figura 6 Parâmetros da impedância da linha.....	21
Figura 7 Parâmetros da resistência de aterramento.....	22
Figura 8 Representação do transformador.....	22
Figura 9 Parâmetros do transformador.....	23
Figura 10 Representação do cabeamento trifásico.....	23
Figura 11 Representação do cabeamento monofásico.....	23
Figura 12 Parâmetros do cabo 1/0CA.....	24
Figura 13 Parâmetros do cabo 2/0CA.....	24
Figura 14 Parâmetros do cabo 4/0CA.....	25
Figura 15 Representação da potência que a luminária consome.....	25
Figura 16 Montagem interna do bloco de potência.....	26
Figura 17 Parâmetros de potência da lâmpada VS.....	26
Figura 18 Parâmetros de potência da lâmpada VM.....	27
Figura 19 Parâmetros de potência da luminária LED.....	27
Figura 20 Representação das correntes harmônicas que a luminária produz.....	28
Figura 21 Montagem interna do bloco das correntes harmônicas.....	29
Figura 22 Representação do medidor de desequilíbrio do sistema.....	29
Figura 23 Parte interna do medidor de desequilíbrio do sistema.....	30
Figura 24 Representação da calculadora de perdas do sistema.....	31
Figura 25 Representação do medidor de queda de tensão.....	32
Figura 26 Representação do bloco que calcula a potência consumida e o fator de potência do sistema.....	33

Figura 27 Forma de onda da corrente que sai do transformador para alimentação do sistema com lâmpadas VS.....	34
Figura 28 Dados obtidos na simulação com as lâmpadas VS.....	35
Figura 29 Forma de onda da corrente que sai do transformador para alimentação do sistema com lâmpadas VM .....	36
Figura 30 Dados obtidos na simulação com as lâmpadas VM. ....	36
Figura 31 Forma de onda da corrente que sai do transformador para alimentação do sistema com lâmpadas LED.....	37
Figura 32 Dados obtidos na simulação com as lâmpadas LED.....	37



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espectro típico de corrente harmônica com amplitude e ângulo de fase para lâmpada a vapor de sódio. ....	18
Tabela 2 – Espectro típico de corrente harmônica com amplitude e ângulo de fase para lâmpada a vapor de metálico. ....	19
Tabela 3 – Espectro típico de corrente harmônica com amplitude e ângulo de fase para lâmpada LED.....	19
Tabela 4 – Dados retirados das simulações.....	38

## SUMÁRIO

<b>CAPITULO I</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIO DE ENERGIA ELÉTRICA CEMIG</b>	<b>12</b>
<b>1.2 LÂMPADAS A VAPOR DE SÓDIO (VS)</b>	<b>12</b>
<b>1.3 LAMPÂDAS A VAPOR METÁLICO (VM)</b>	<b>13</b>
<b>1.4 LÂMPADA LED</b>	<b>13</b>
<b>1.5 HARMÔNICOS</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO II</b>	<b>16</b>
<b>2. ESTUDO DOS IMPACTOS DOS DIVERSOS TIPOS DE LAMPADAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA</b>	<b>16</b>
<b>2.1 METODOLOGIA</b>	<b>16</b>
<b>2.2 DADOS E CONSIDERAÇÕES</b>	<b>17</b>
<b>CAPITULO III</b>	<b>20</b>
<b>3. MODELAGEM NO MATLAB®/SIMULINK</b>	<b>20</b>
<b>3.1 COMPONENTES DO SISTEMA</b>	<b>20</b>
<b>3.1.1 SISTEMA PRIMÁRIO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELETRICA</b>	<b>20</b>
<b>3.1.2 TRANSFORMADOR DE ENERGIA</b>	<b>22</b>
<b>3.1.3 CABEAMENTO DO SISTEMA SECUNDÁRIO</b>	<b>23</b>
<b>3.1.4 LUMINÁRIAS</b>	<b>25</b>
<b>3.1.5 CALCULO DO FATOR DE DESEQUILIBRIO</b>	<b>29</b>

<b>3.1.6 CÁLCULO DE PERDAS RESISTIVAS</b>	<b>31</b>
<b>3.1.7 QUEDA DE TENSÃO</b>	<b>32</b>
<b>3.1.8 POTÊNCIA CONSUMIDA PELO SISTEMA E FATOR DE POTÊNCIA</b>	<b>32</b>
<b>CAPITULO IV</b>	<b>33</b>
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>33</b>
<b>4.1 CASO 1 – SISTEMA COM LUMINÁRIAS VS</b>	<b>34</b>
<b>4.2 CASO 2 – SISTEMA COM LUMINÁRIAS VM</b>	<b>35</b>
<b>4.3 CASO 3 – SISTEMA COM LUMINÁRIAS LED</b>	<b>37</b>
<b>CAPITULO V</b>	<b>38</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>38</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>40</b>
<b>APÊNDICE A – ESQUEMA COMPLETO DA SIMULAÇÃO NO SIMULINK</b>	<b>41</b>

## **CAPITULO I**

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIO DE ENERGIA ELÉTRICA CEMIG**

Segundo a norma ND-3.1 da Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG) o sistema de distribuição secundário é a parte do sistema elétrico de distribuição que deriva dos transformadores ligados às redes primárias (Média Tensão) e se destina ao suprimento dos consumidores atendidos em tensão secundária, e à iluminação pública. A norma ND-2.7 define as instalações básicas para Redes de Distribuição Aéreas Isoladas, RDI, com cabos multiplexados e autossustentados, na área de concessão da CEMIG, para os sistemas monofásico e trifásico com tensões secundárias 120/240 volts e 127/220 Volts, respectivamente e tensões primárias de 7.967/13.800 Volts.

#### **1.2 LÂMPADAS A VAPOR DE SÓDIO (VS)**

As lâmpadas de vapor de sódio são lâmpadas de descarga em meio gasoso que utiliza um plasma de vapor de sódio para produzir luz. Para este tipo existem algumas variedades sendo algumas delas as de baixa pressão (LPS), e as de alta pressão (HPS), que são as utilizadas neste trabalho. As lâmpadas de vapor de sódio emitem uma luz quase monocromática, sendo essa com uma temperatura de cor próxima dos 2700K e com um índice de reprodução de cor (IRC) de 85, este próximo aos obtidos de uma lâmpada incandescente. essa monocromia causa aos objetos iluminados uma luminosidade incomum e cores dificilmente distinguíveis, sendo isto resultado da reflexão da pequena largura de banda de luz amarelada emitida pela lâmpada.

A eficiência encontrada nesse tipo de lâmpada, média de 100 lumens/Watt, faz dela uma boa escolha quando se pretende iluminar algo com um consumo energético reduzido. Mas devido a sua monocromia, esta, é aconselhável apenas para uso exterior ou iluminação de segurança em casos em que a distinção das cores não seja importante.

Portanto este tipo de lâmpada é uma boa escolha para situações onde poluição luminosa seja uma restrição. Por isso esse tipo de lâmpada é muito encontrado em imediações de áreas onde se pretende reduzir a interferência da iluminação exterior com a fauna noturna, um exemplo seriam os observatórios astronômicos.

### **1.3 LAMPÂDAS A VAPOR METÁLICO (VM)**

Assim como as de vapor de sódio, as de vapor metálico também são lâmpadas de descarga em meio gasoso. Essas lâmpadas surgiram de uma evolução das lâmpadas de vapor de mercúrio, tornando-se um tipo particular da mesma. A diferença entre essas lâmpadas consiste na adição de metais no tubo de descarga da lâmpada, sendo estes: índio, tálio e sódio. Juntos, esses metais melhoram consideravelmente a emissão de cores através do fluxo luminoso.

Essas lâmpadas produzem um fluxo luminoso de excelente reprodução de cores, ou seja, consegue iluminar o ambiente com uma ótima qualidade. A temperatura de cor dessas lâmpadas é próxima dos 4000K, além de apresentar uma elevada eficiência luminosa.

Esse tipo de lâmpada necessita geralmente de um reator para a estabilização da corrente ao nível do projeto da lâmpada. Eletricamente os reatores se apresentam como uma reatância série do circuito da lâmpada, sendo este um componente essencial para o funcionamento da lâmpada VM.

As lâmpadas de vapor metálico, por possuírem um excelente fluxo luminoso são indicadas para diversas aplicações onde se requer uma excelente resolução de imagem, por exemplo quadras esportivas, campos de futebol, locais destinados a exposição e áreas industriais onde é necessário um controle visual para garantia de qualidade.

### **1.4 LÂMPADA LED**

Diferente das lâmpadas de descarga esta é uma junção de componentes eletrônicos, os diodos emissores de luz, do inglês light-emitting diode (LED). O LED é um diodo semicondutor que quando energizado emite luz, já que não contém filamento não produz tanto calor quanto as outras citadas acima. A luz emitida não é

monocromática, mas a banda colorida é relativamente estreita. A cor depende do cristal e da dopagem em que o LED é fabricado.

As lâmpadas de LED necessitam de uma menor quantidade de energia para gerar o mesmo fluxo luminoso que outras lâmpadas e não utiliza um reator e sim um circuito eletrônico conhecido como drive. Além da eficiência energética as lâmpadas de LED possuem vários outros benefícios, como: Qualidade da luz (é visivelmente confortável), baixa geração de calor, maior durabilidade em comparação com outras lâmpadas e fácil descarte, uma vez que não contem chumbo ou mercúrio.

## **1.5 HARMÔNICOS**

Com o crescimento desenfreado das cargas eletroeletrônicas, sejam estas para utilização residencial ou industrial, são gerados harmônicos nas formas de onda de tensão e corrente, estes, podendo causar efeitos prejudiciais ao funcionamento dos equipamentos nessas instalações subsequentemente a vida útil dos mesmos.

Os principais efeitos das componentes harmônicas podem trazer à rede elétrica problemas como: sobretensão, sobrecorrente, operações indevidas ou erros em diversos equipamentos de controle, proteção e medição (relés, medidores, controles eletrônicos, dentre outros), até perda de vida útil de equipamentos.

Diante do que foi exposto acima, as luminárias não estão fora desta realidade, as figuras a seguir apresentam o espectro harmônico das correntes de cada lâmpada citada.

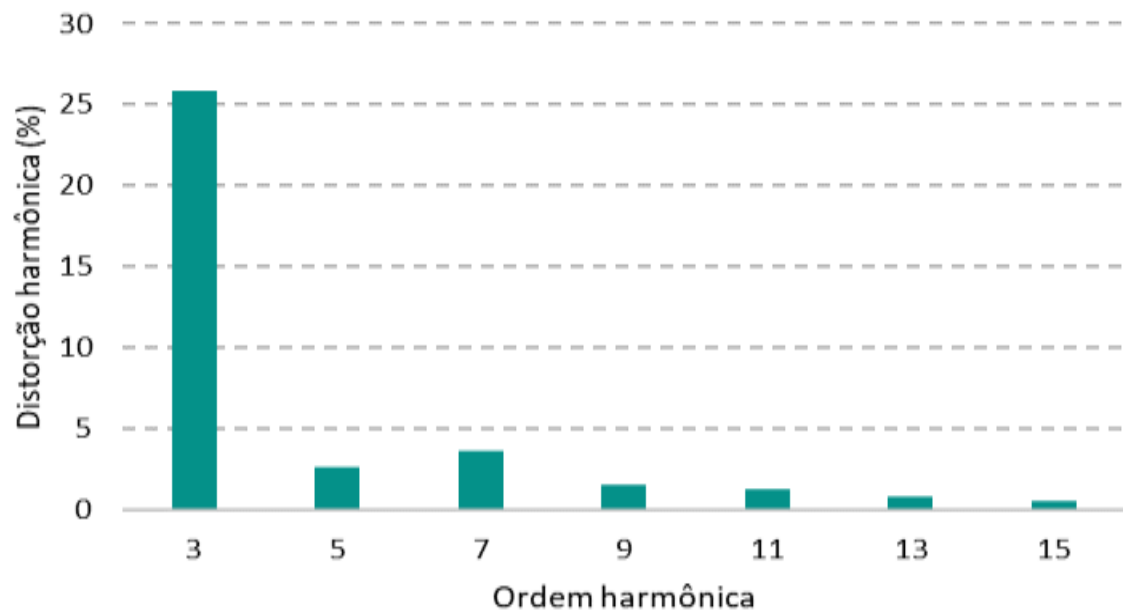


Figura 1 – Distorções harmônicas individuais de corrente de uma lâmpada de vapor de sódio.

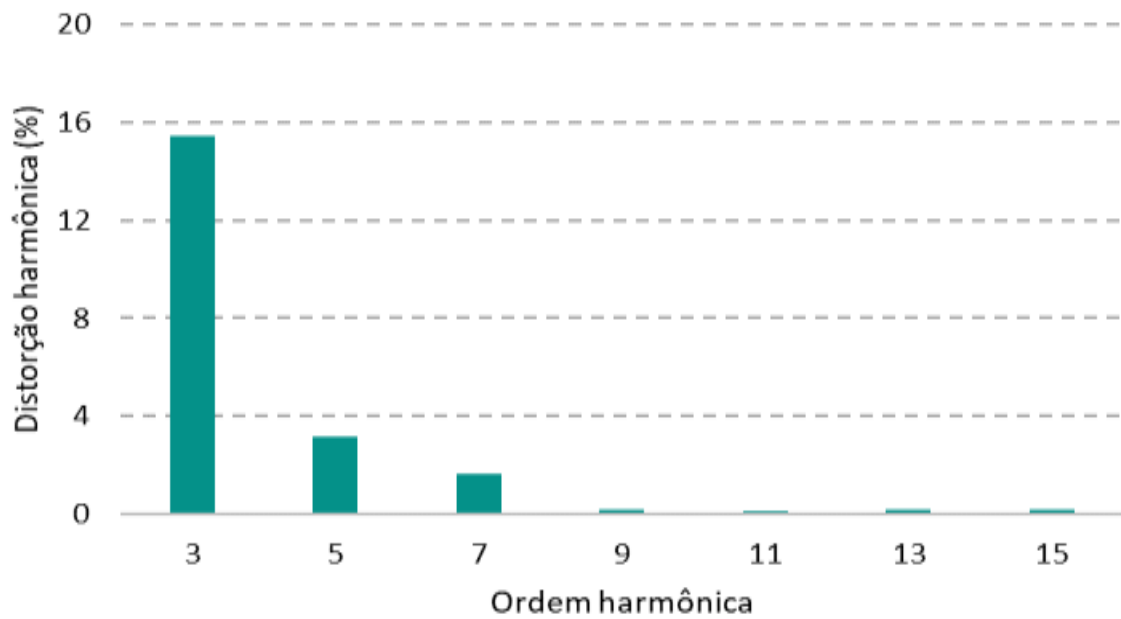


Figura 2 – Distorções harmônicas individuais de corrente de uma lâmpada de vapor metálico.

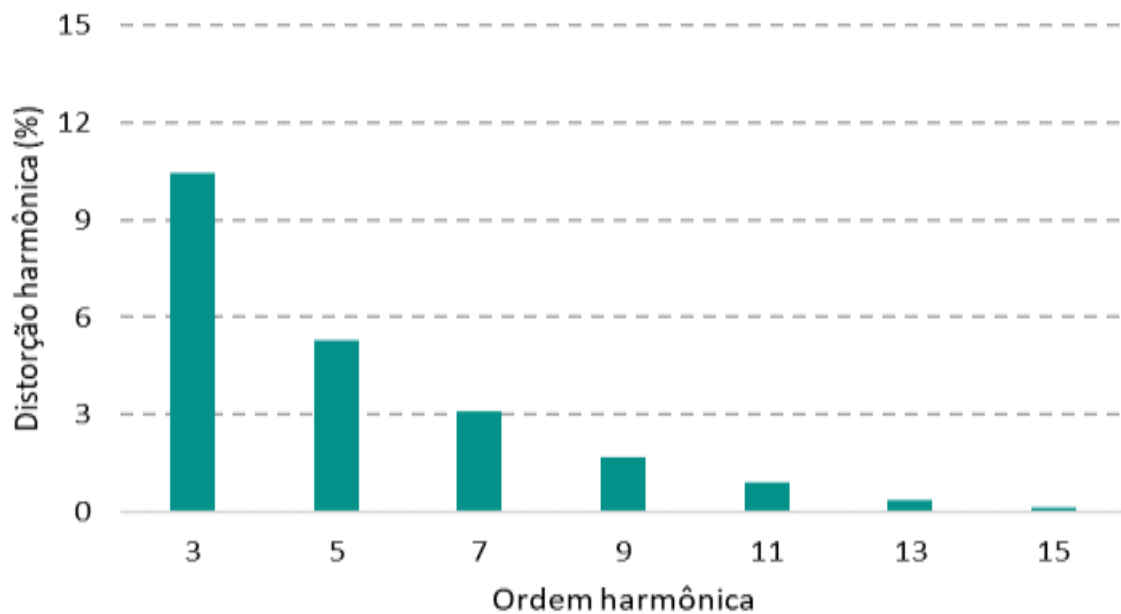


Figura 3 – Distorções harmônicas individuais de corrente de uma luminária de LED.

## CAPITULO II

### 2. ESTUDO DOS IMPACTOS DOS DIVERSOS TIPOS DE LAMPADAS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA

Como já citado, este estudo irá analisar o comportamento da rede de distribuição após a troca para cada tipo de lâmpada estudada. O comportamento da rede será comparado para cada tipo de lâmpada, citada no capítulo anterior, em busca de qual é o melhor a ser utilizada.

#### 2.1 METODOLOGIA

Os principais pontos a serem considerados nesse estudo são:

- Perdas na rede de distribuição secundária;
- Fator de desequilíbrio da rede secundária
- Tensão no final da linha da rede secundária
- Corrente total circulando pelo circuito.



Todos os casos que serão analisados influenciam a rede de distribuição secundária de uma maneira distinta. Sendo assim, o estudo foi dividido em três casos, onde, no primeiro será analisado a rede de distribuição com as lâmpadas VS, no segundo o comportamento da rede com as lâmpadas VM e no terceiro o mesmo comportamento, mas com as lâmpadas LED.

Em todos os casos o estudo será feito apenas para com cada tipo de lâmpada conectadas no circuito, sem cargas adicionais. Após as lâmpadas conectadas serão analisadas as perdas na rede, o fator de desequilíbrio, a tensão no final e a corrente total que sai do transformador que alimenta o circuito.

## **2.2 DADOS E CONSIDERAÇÕES**

Para a modelagem do sistema, que foi feita por meio de simulação computacional no software Matlab<sup>®</sup>/simulink foram necessários os parâmetros da rede de distribuição secundária, do transformador utilizado e dos dados de cada tipo das lâmpadas utilizadas.

Além disso existem também algumas observações sobre os dados que serão utilizados:

- O transformador utilizado nas simulações é trifásico ligado com entrada de 13,8 kV em delta e saída em 127 V em estrela, ambas por fase, com potência nominal de 45kVA.
- As tensões apresentadas nos cálculos desse trabalho são tensões de linha.
- As potências de cada lâmpada foram escolhidas visando que todas tivessem um fluxo luminoso equivalente.
- A lâmpada VS terá uma potência de 100W.
- A lâmpada VM terá uma potência de 400W.
- A lâmpada LED terá uma potência de 50W.

- Para tornar a rede mais fiel à realidade, foram utilizados três tipos de cabamentos diferentes se alternando entre os postes, ou seja, a cada 30 metros. Os cabos escolhidos foram 1/0CA, 2/0CA e 4/0CA.

Foram levados em conta também os parâmetros internos do transformador e das luminárias, contendo estas fontes de corrente para simular os harmônicos produzidos por cada tipo de lâmpada, para que a simulação ficasse bem próxima dos valores reais. Tanto para o enrolamento primário quanto para o secundário foram considerados os valores de resistência e indutância de 0.002pu e 0.08pu respectivamente. Já para o ramo magnetizante foi utilizado 500pu, tanto para a resistência quanto para a indutância;

Já para as lâmpadas foram utilizados os valores tirados de um estudo do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Os valores e ângulos das correntes fundamentais e harmônicas para as lâmpadas VS de 100W tem seus valores dispostos na tabela abaixo.

Ordem Harmônica	Amplitude [%]	Ângulo de fase
1	100,00	-14,44°
3	25,85	-47,23°
5	2,61	129,29°
7	3,65	43,52°
9	1,49	-83,10°
11	1,21	148,34°
13	0,82	31,44°
15	0,47	-91,05°

Tabela 1 – Espectro típico de corrente harmônica com amplitude e ângulo de fase para lâmpada a vapor de sódio.

Os valores e ângulos das correntes fundamentais e harmônicas para as lâmpadas VM de 400W tem seus valores dispostos na tabela abaixo.

Ordem Harmônica	Amplitude [%]	Ângulo de fase
1	100,00	-26,12°
3	15,46	-46,56°
5	3,16	91,16°
7	1,66	53,21°
9	0,21	-115,26°
11	0,14	144,26°
13	0,21	35,79°
15	0,22	-31,90°

Tabela 2 – Espectro típico de corrente harmônica com amplitude e ângulo de fase para lâmpada a vapor metálico.

E os valores e ângulos das correntes fundamentais e harmônicas para as lâmpadas LED de 50W também seguem na tabela disposta abaixo.

Ordem Harmônica	Amplitude [%]	Ângulo de fase
1	100,00	7,41°
3	10,42	-169,98°
5	5,27	-172,54°
7	3,11	-168,78°
9	1,69	-165,38°
11	0,89	-160,58°
13	0,37	-151,33°
15	0,14	-119,65°

Tabela 3 – Espectro típico de corrente harmônica com amplitude e ângulo de fase para lâmpada LED.

## CAPITULO III

### 3. MODELAGEM NO MATLAB®/SIMULINK

A modelagem do sistema de distribuição foi feita no Matlab®/Simulink, pois com ele é possível uma montagem visual do circuito. As simulações foram feitas com uma amostra de tempo de 2/60 ciclos, 33.33ms, sendo não mais que isso necessário para obtenção dos valores necessitados para o estudo

#### 3.1 COMPONENTES DO SISTEMA

Os tópicos a seguir mostrarão como foram modelados os elementos do sistema no Simulink. O sistema completo da simulação estará posto no final deste trabalho.

##### 3.1.1 SISTEMA PRIMÁRIO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

Para o sistema primário de distribuição, o de média tensão, foi utilizada uma fonte trifásica com intuito de alimentar um transformador trifásico. Observa-se na Figura 4 a representação desta fonte, seguida de uma impedância representando a linha do sistema primário e ainda uma resistência de aterramento. Serão apresentados nas Figura 5, 6 e 7 respectivamente, os parâmetros da fonte trifásica, da impedância da linha do sistema primário e a resistência de aterramento do sistema.

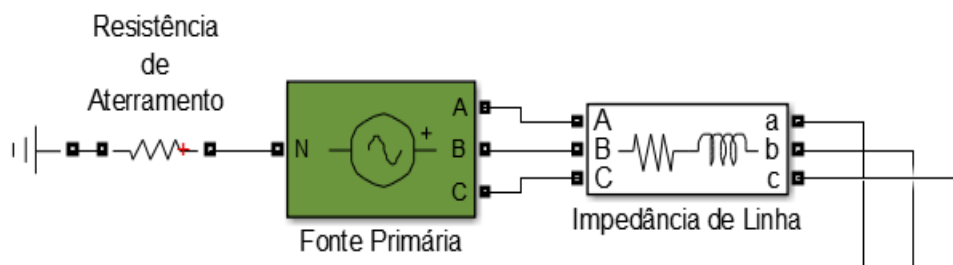


Figura 4 - Representação do sistema primário de distribuição.

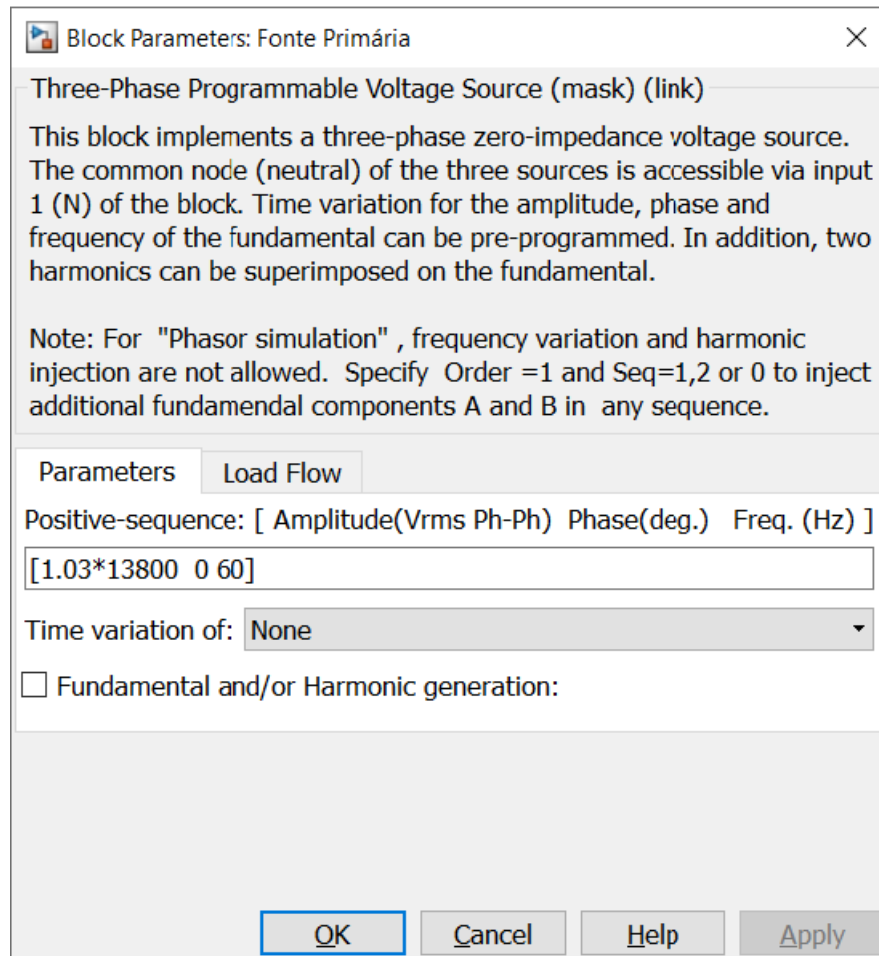


Figura 5 - Parâmetros da fonte de alimentação trifásica do sistema primário.

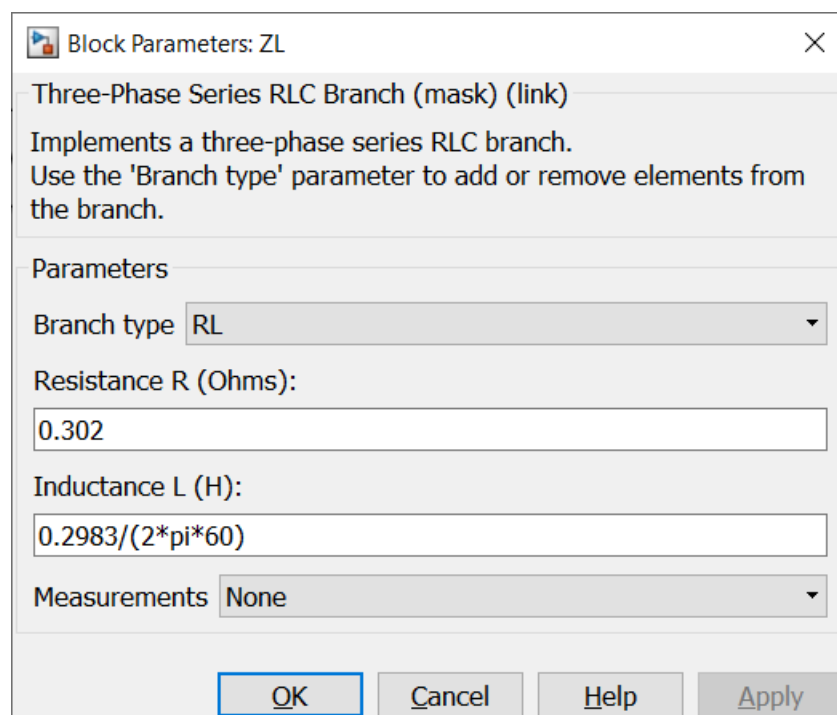


Figura 6 - Parâmetros da impedância da linha.

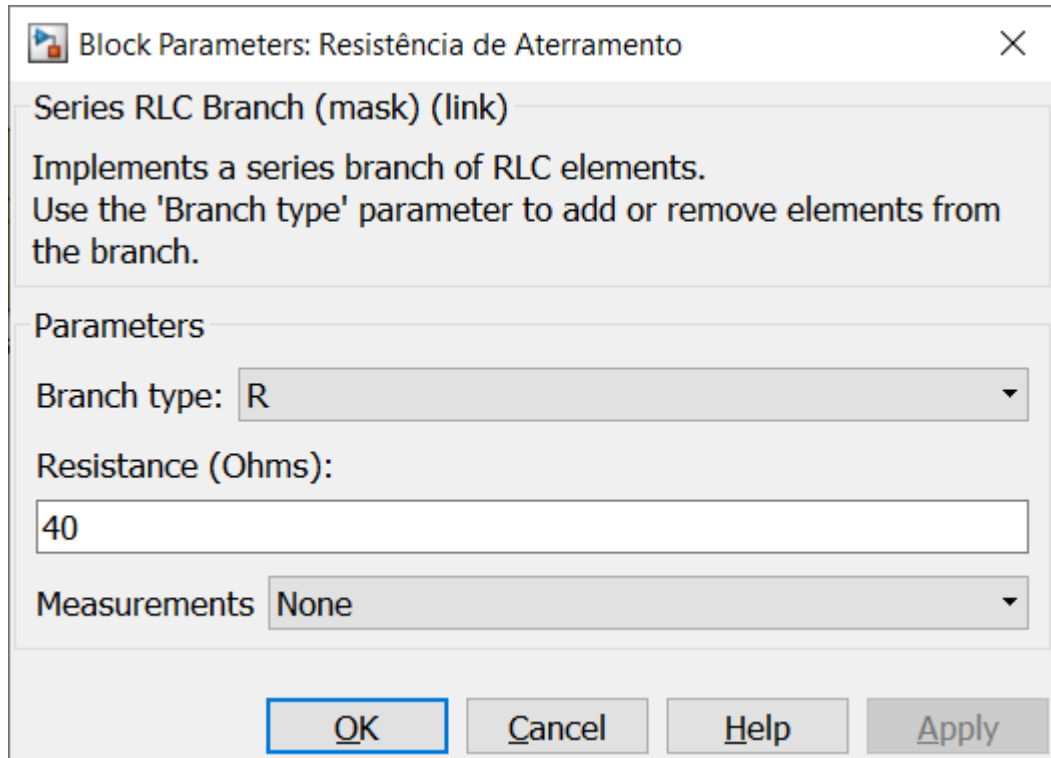


Figura 7 - Parâmetros da resistência de aterramento.

### 3.1.2 TRANSFORMADOR DE ENERGIA

Com intuito de simular um sistema real, foi colocado um transformador de energia para a redução das tensões de 13.8kV, presentes no circuito primário, para 127V, esse valor de fase para o sistema secundário. Os parâmetros desse transformador já foram citados acima, mas serão novamente apresentados na figura 9.

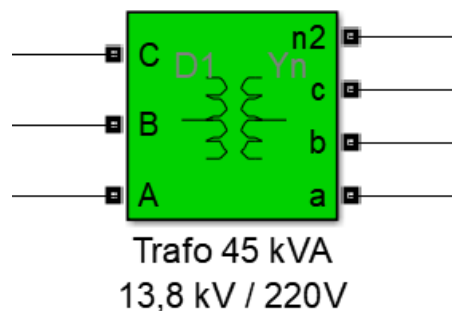


Figura 8 - Representação do transformador.

Figura 9 - Parâmetros do transformador.

### 3.1.3 CABEAMENTO DO SISTEMA SECUNDÁRIO

Para simular os cabamentos do sistema foi utilizado os bloco de impedância de linha, trifásicos para simular os cabamentos e monofásicos quando referente ao neutro. Cada cabeamento contem valores diferentes que também serão apresentados nas figuras 12, 13 e 14.



Figura 10 - Representação do cabeamento trifásico.



Figura 11 - Representação do cabeamento monofásico.

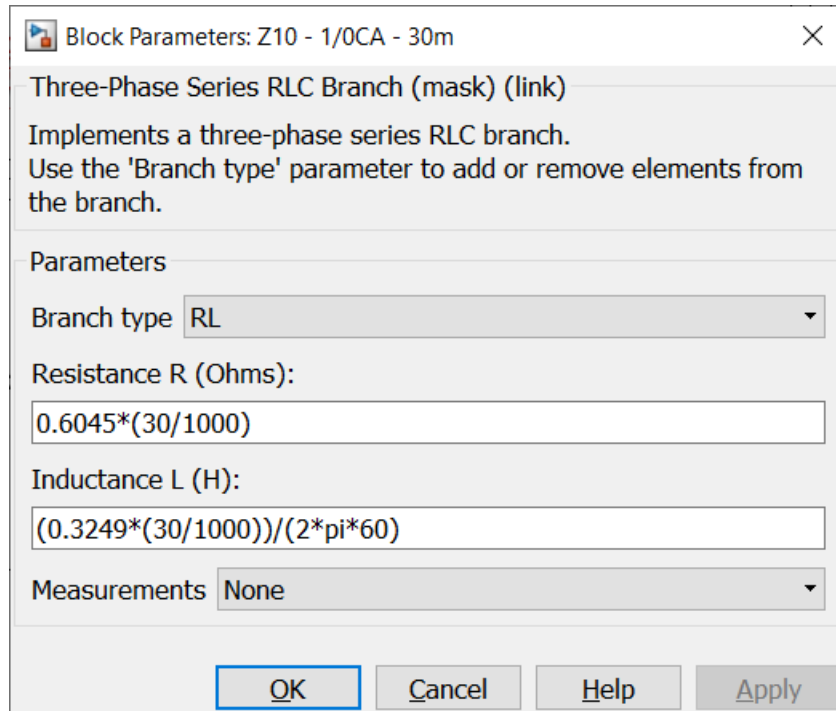


Figura 12 – Parâmetros do cabo 1/0CA.

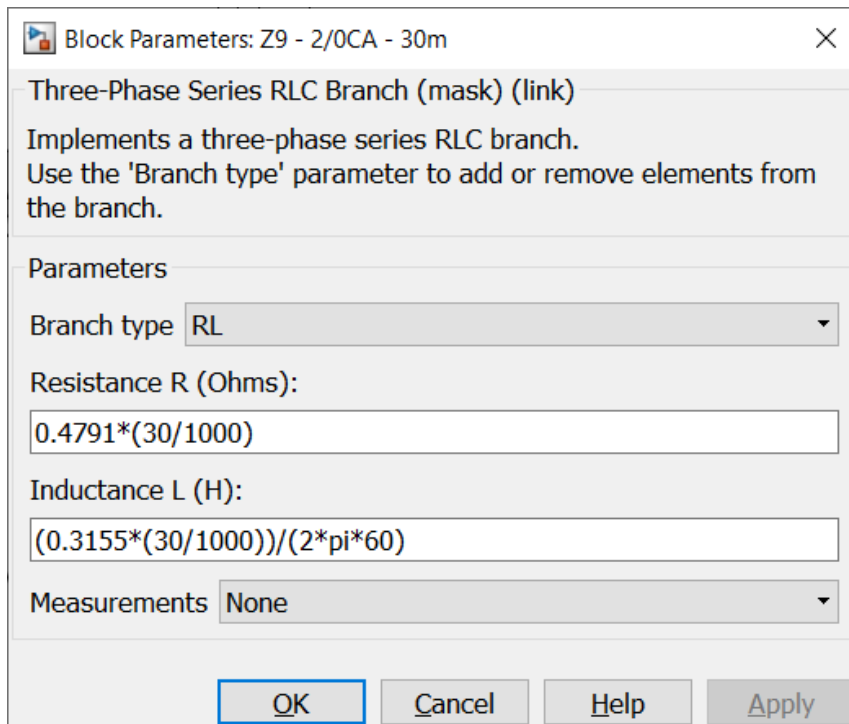


Figura 13 – Parâmetros do cabo 2/0CA.



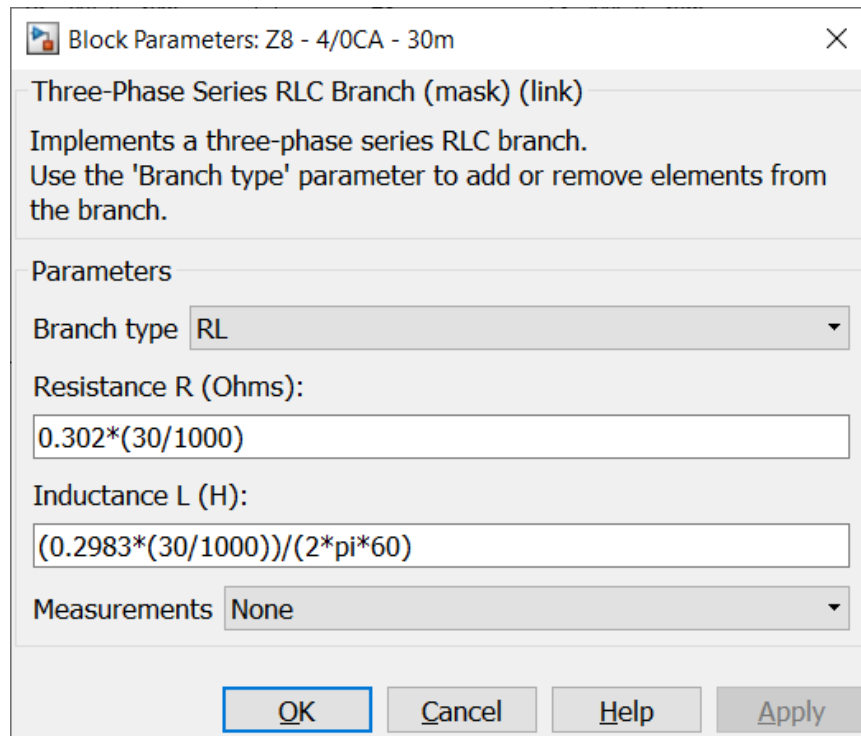


Figura 14 – Parâmetros do cabo 4/0CA.

### 3.1.4 LÂMPADAS

Os três tipos de lâmpadas utilizadas foram apresentados por 2 blocos em paralelo, sendo destes um, contendo carga do tipo RL, para representar a potência que a lâmpada demanda do sistema, com seus valores, para com cada lâmpada, apresentados nas figuras 17, 18 e 19.



Figura 15 - Representação da potência que a lâmpada consome.

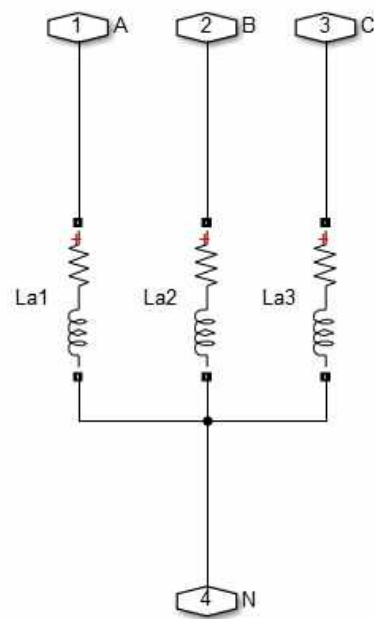


Figura 16 – Montagem interna do bloco de potência.

The image shows a software dialog box titled "Block Parameters: La1". It contains the following fields and options:

- Parameters** (selected tab) / **Load Flow** (unselected tab)
- Nominal voltage  $V_n$  (Vrms): 127
- Nominal frequency  $f_n$  (Hz): 60
- Active power  $P$  (W): 100
- Inductive reactive power  $Q_L$  (positive var): 25.75
- Capacitive reactive power  $Q_c$  (negative var): 0
- Set the initial capacitor voltage
- Capacitor initial voltage (V): 0
- Set the initial inductor current
- Inductor initial current (A): 0
- Measurements: None

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help, Apply.

Figura 17 – Parâmetros de potência da luminária VS.

Block Parameters: La1

Series RLC Load (mask) (link)  
Implements a series RLC load.

Parameters Load Flow

Nominal voltage  $V_n$  (Vrms):  
127

Nominal frequency  $f_n$  (Hz):  
60

Active power  $P$  (W):  
400

Inductive reactive power  $Q_L$  (positive var):  
196.1311

Capacitive reactive power  $Q_c$  (negative var):  
0

Set the initial capacitor voltage  
Capacitor initial voltage (V)  
0

Set the initial inductor current  
Inductor initial current (A):  
0

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Figura 18 – Parâmetros de potência da luminária VM.

Block Parameters: La2

Series RLC Load (mask) (link)  
Implements a series RLC load.

Parameters Load Flow

Nominal voltage  $V_n$  (Vrms):  
127

Nominal frequency  $f_n$  (Hz):  
60 *Right-click for actions*

Active power  $P$  (W):  
50

Inductive reactive power  $Q_L$  (positive var):  
6.5219

Capacitive reactive power  $Q_c$  (negative var):  
0

Set the initial capacitor voltage  
Capacitor initial voltage (V)  
0

Set the initial inductor current  
Inductor initial current (A):

OK Cancel Help Apply

Figura 19 – Parâmetros de potência da luminária LED

O cálculo da potência reativa (Q) presente em cada um desses parâmetros foi feito sabendo-se inicialmente a potência ativa (P) demandada por cada luminária e também seu fator de potência (FP), este calculado através do ângulo da corrente ( $\theta$ ) fundamental de cada luminária a partir da seguinte equação:

$$FP = \cos(\theta)$$

Após o cálculo de FP é possível calcular a potência aparente dessa carga com a seguinte equação:

$$S = \frac{P}{FP}$$

Com o valor de S em mãos fica simples a obtenção de Q através da seguinte equação:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Obtendo assim a potência reativa demandada para cada tipo de luminária.

Já o segundo, contendo fontes de corrente, para simular as distorções harmônicas que cada tipo de luminária envia para a rede, valores estes encontrados nas figuras 1,2 e 3.



Figura 20 - Representação das correntes harmônicas que a luminária produz.

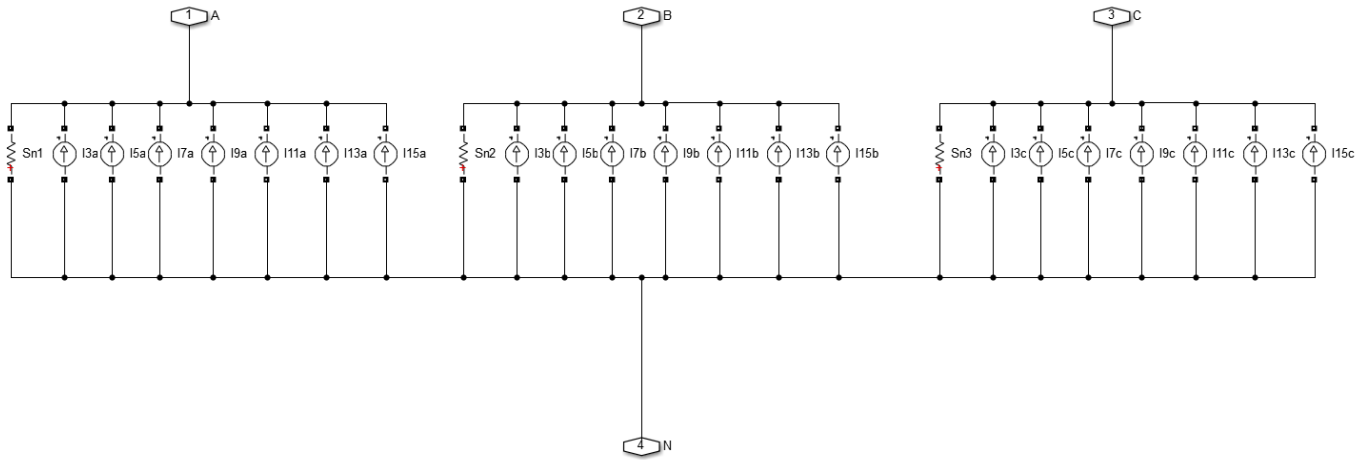


Figura 21 – Montagem interna do bloco das correntes harmônicas.

### 3.1.5 CALCULO DO FATOR DE DESEQUILIBRIO

Para a obtenção do fator de desequilíbrio foi utilizado o método de cálculo utilizado pelo Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ), este montado por vários blocos, mas este foi condensado em um bloco no qual há um display para mostrar o valor calculado, como mostrado na figura abaixo.

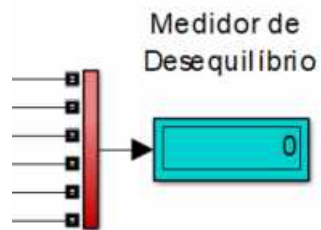


Figura 22 - Representação do medidor de desequilíbrio do sistema.

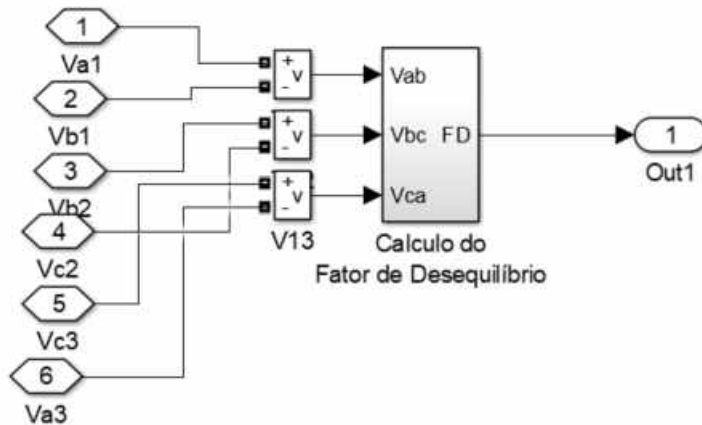


Figura 23 – Parte interna do medidor de desequilíbrio do sistema.

Como dito anteriormente o cálculo do fator de desequilíbrio foi feito pelo método utilizado pelo CIGRÉ. Este método foi colocado dentro do bloco “Cálculo do Fator de Desequilíbrio”, devida a grande quantidade de blocos que compõe o bloco o método será descrito abaixo.

A primeira etapa para se calcular o fator de desequilíbrio (VUF) é achar o valor da variável  $\beta$ , esta variável é encontrada após obter os valores das tensões de linha do sistema ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$ ) e substituí-las na seguinte equação:

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

Após encontrado o valor de  $\beta$ , bastá substituí-lo em mais uma equação, para se obter o valor de VUF, sendo esta equação:

$$VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - (6x\beta)}}{1 + \sqrt{3 - (6x\beta)}}}$$

### 3.1.6 CÁLCULO DE PERDAS RESISTIVAS

Para a obtenção das perdas do sistema novamente foi utilizado um bloco seguido de um display, este que, mostra o valor total da potência dissipada pelo circuito, o bloco em questão é mostrado na figura 24, esta, postada logo abaixo.

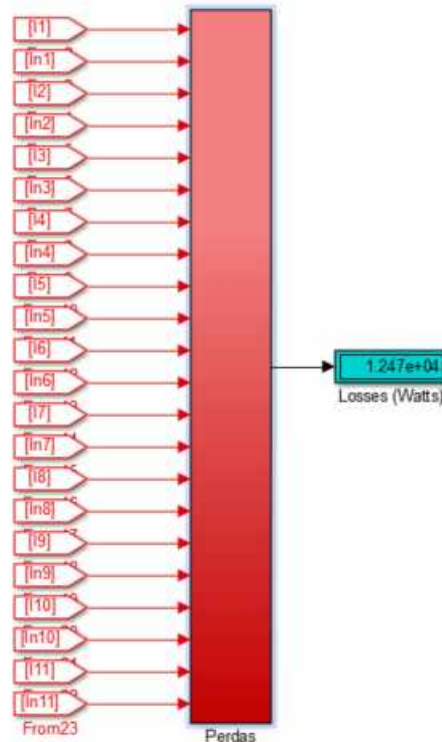


Figura 24 – Representação da calculadora de perdas do sistema.

Esse bloco coleta as correntes ( $I$ ) de cada ramo do circuito e utilizando os valores da resistência do cabo ( $R$ ) onde passa tal corrente calcula as perdas monofásicas ( $P$ ) para tal ramo, como demonstrado na equação abaixo:

$$P = I^2 * R$$

Após a perda monofásica calculada basta apenas se multiplicar o valor encontrado por três para encontrar as perdas totais daquele ramo, lembrando que além do cabeamento trifásico, com três cabos, ainda existe o cabo de neutro e este não entra no modelo agora citado por conter apenas um cabo, além de ter uma corrente diferente da que circula no cabeamento trifásico:

$$P_{3\phi} = 3x P$$

Após encontradas as perdas nos ramos trifásicos e nos neutros, basta fazer a somatória dessas potências.

### 3.1.7 QUEDA DE TENSÃO

Após a mostra das perdas, estas que trazem como consequência alguns problemas para a rede e um desses problemas é a queda de tensão. Na simulação foram montados dois medidores, um para medir a tensão na barra mais distante do lado esquerdo e um para calcular a tensão na barra mais distante pela direita. Medidores estes mostrados na figura 25 logo abaixo.

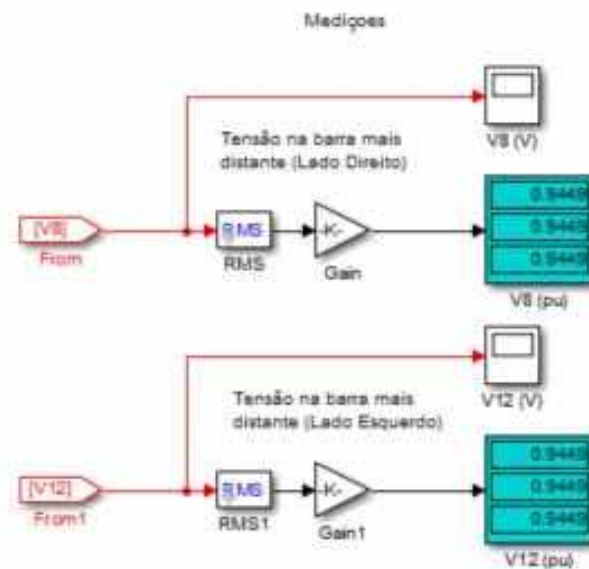


Figura 25 – Representação do medidor de queda de tensão.

Nota-se pela figura que os valores mostrados não são valores reais ( $V_{real}$ ) e sim em valores por unidade (PU), que é obtido por uma simples divisão entre o valor real, este tirado da última barra de cada lado do circuito, e um valor base ( $V_{base}$ ), que nesse caso, o valor base escolhido foi a tensão fase-neutro do sistema, 127V.

$$PU = \frac{V_{real}}{V_{base}}$$

### 3.1.8 POTÊNCIA CONSUMIDA PELO SISTEMA E FATOR DE POTÊNCIA

Um importante dado a ser analisado é a eficiência energética que essa troca trás para o sistema de distribuição, para isso foi montado um bloco para medir toda a potência demandada e desta medição ainda conseguimos tirar o fator de potência do sistema, a figura 26, postada abaixo, mostra o bloco que faz esse cálculo.



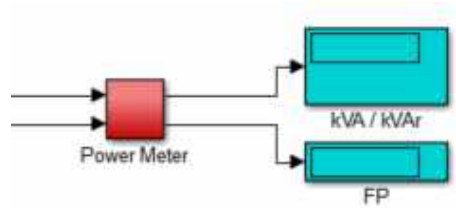


Figura 26 – Representação do bloco que calcula a potência consumida e o fator de potência do sistema.

Internamente, existe um bloco que colocando como dados de entrada as tensões de fase e as correntes de linha que o bloco fornece, como dados de saída, as potências ativas(P) e reativas(Q). Utilizando-se dessas potências fica fácil a obtenção do fator de potência, após encontrar a potência aparente(S) do sistema através da seguinte equação:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Com o valor da potência aparente em mãos, para encontrar o fator de potência (FP) basta apenas dividir a potência ativa pela potência aparente, como colocado na equação abaixo:

$$FP = \frac{P}{S}$$

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS

Para coletar os dados para análise dos resultados, foi montado um sistema, este é mostrado em uma figura no apêndice no final deste trabalho, com 12 lâmpadas divididas em 2 ramos, um desses ramos com 4 lâmpadas e o outro com 8 lâmpadas. Essas lâmpadas foram conectadas na rede utilizando-se de uma técnica de alternância das fases que alimentam as lâmpadas, sendo as lâmpadas de número 1,4,7 e 10 alimentadas pelas fases A e B, as lâmpadas 2,5,8 e 11 pelas fases B e C e as lâmpadas de 3,6,9 e 12 pelas fases AC. Após a montagem do sistema foram-se feitas 3 análises diferente, uma para cada tipo das lâmpadas já citadas.

#### 4.1 CASO 1 – SISTEMA COM LÂMPADAS VS

Para dado inicial de cada um desses casos é interessante observar a forma de onda da corrente e os valores desse sinal obtido, dados que estão mostrados na figura 27 a baixo.

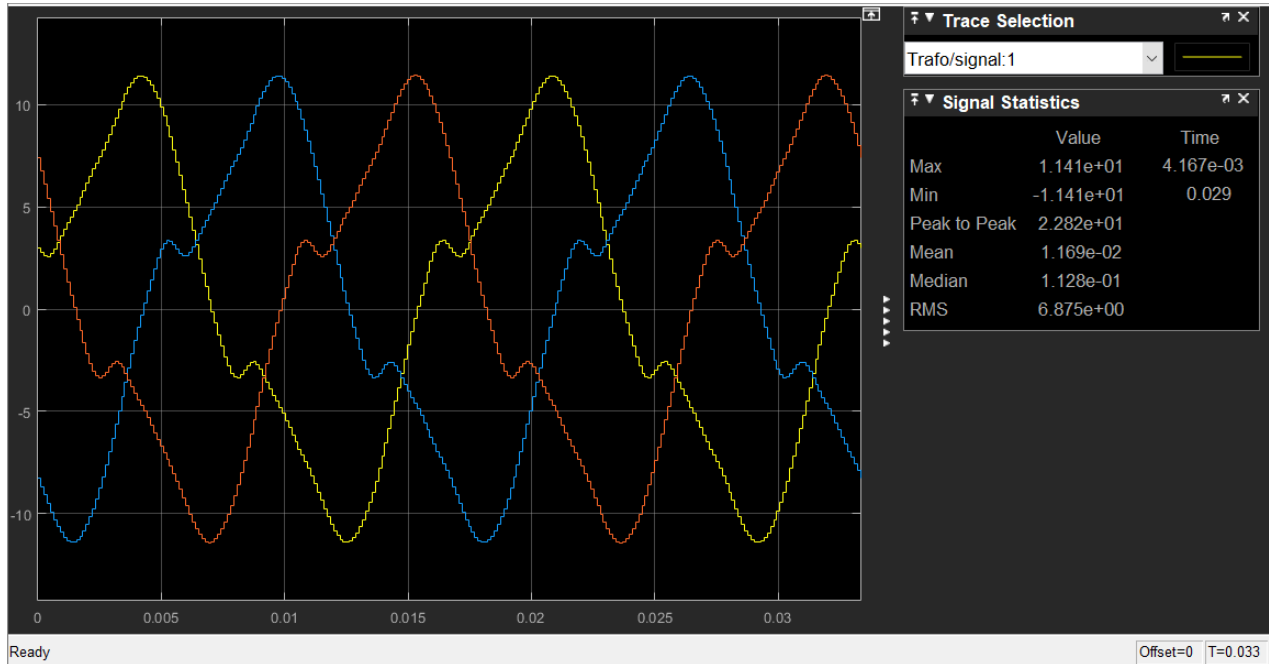


Figura 27 – Forma de onda da corrente que sai do transformador para alimentação do sistema com lâmpadas VS.

Após a forma da corrente mostrada, vamos a amostra obtida por cada um dos blocos de medição mostrados no capítulo anterior. Amostras essas que são mostradas na figura 28.

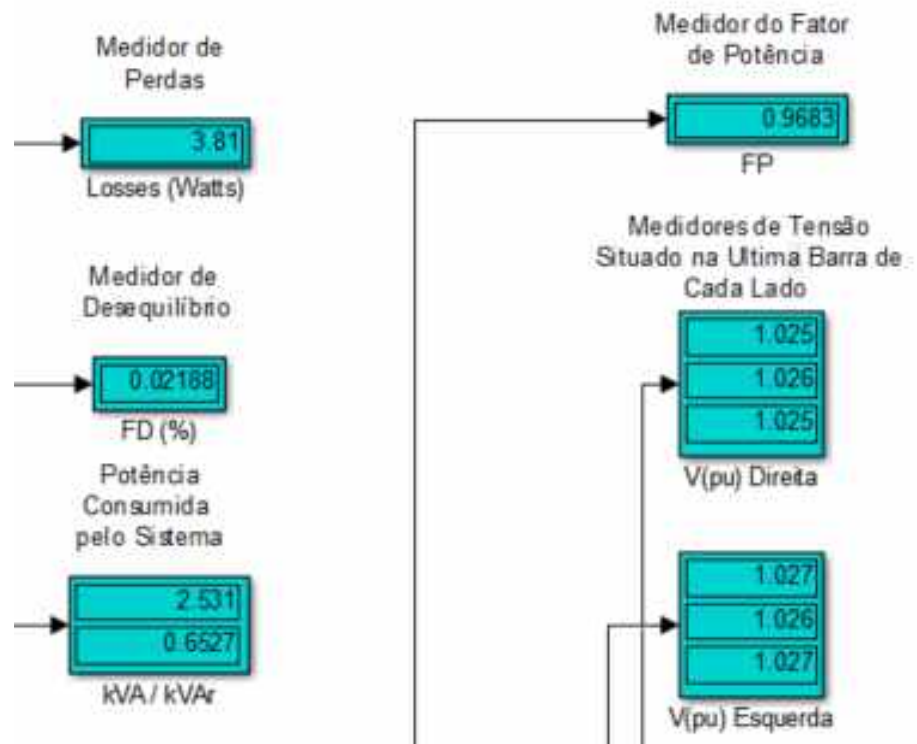


Figura 28 – Dados obtidos na simulação com as lâmpadas VS.

#### 4.2 CASO 2 – SISTEMA COM LÂMPADAS VM

Novamente como dado inicial mostra-se na figura 29 a forma e valores das correntes que saem do transformador, agora para alimentar o sistema com as lâmpadas VM.

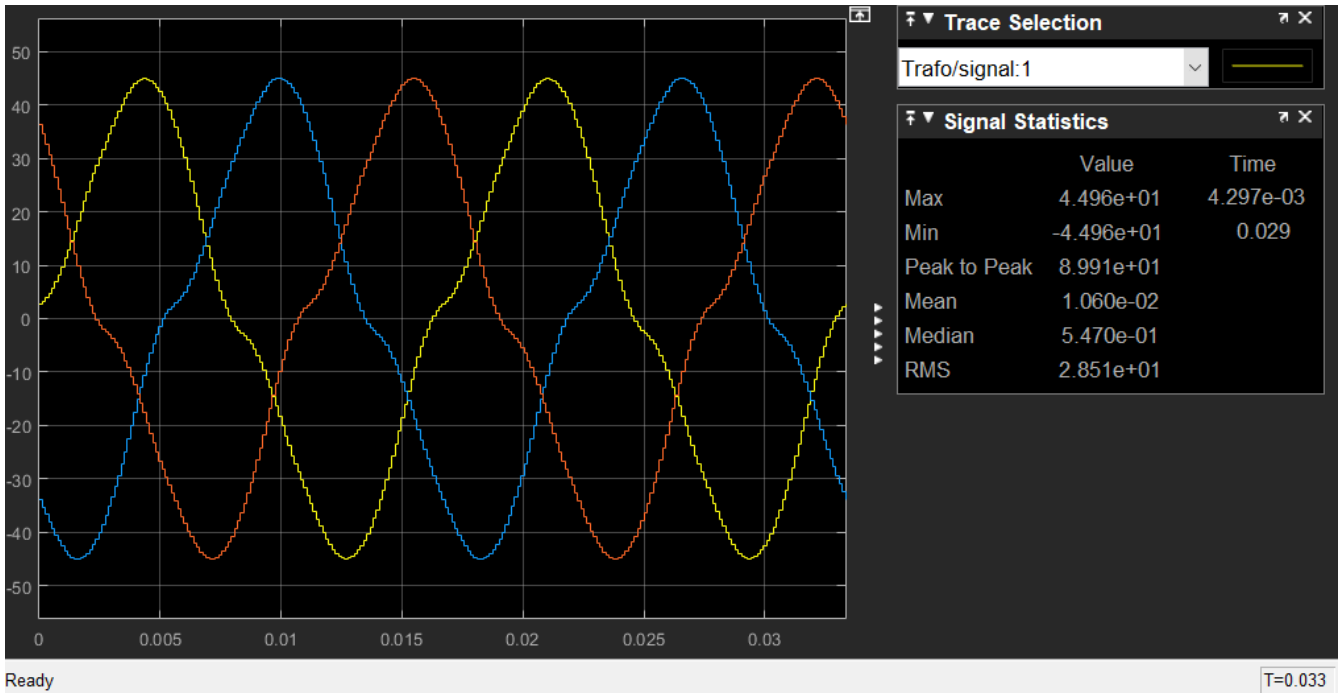


Figura 29 – Forma de onda da corrente que sai do transformador para alimentação do sistema com lâmpadas VM.

E abaixo, na figura 30, os dados mostrados pelos blocos para a atual simulação.

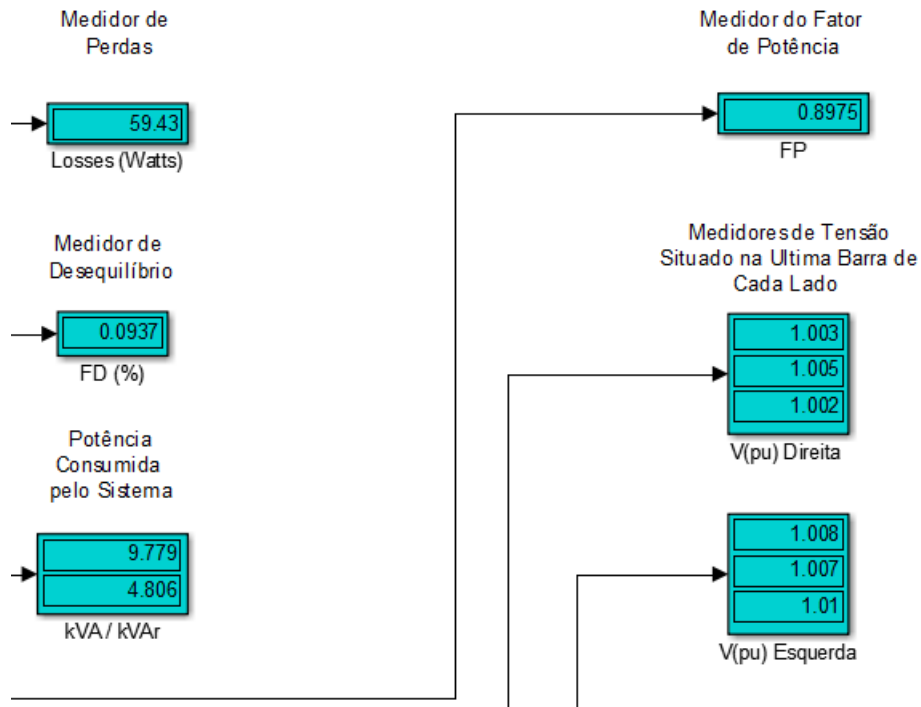


Figura 30 – Dados obtidos na simulação com as lâmpadas VM.

### 4.3 CASO 3 – SISTEMA COM LUMINÁRIAS LED

E por fim a forma de corrente e os dados retirados, respectivamente nas figuras 31 e 32, dos blocos para a simulação com as luminárias de LED como carga.

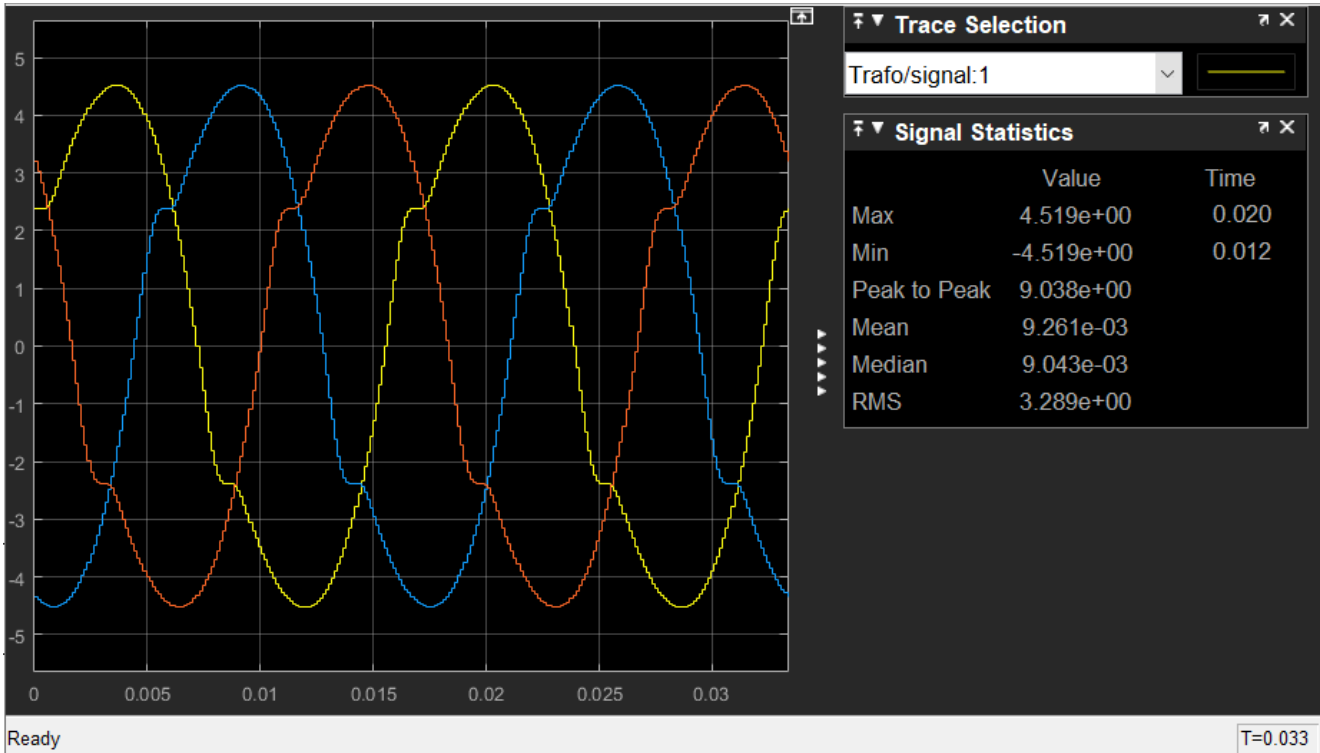


Figura 31 – Forma de onda da corrente que sai do transformador para alimentação do sistema com luminárias LED.

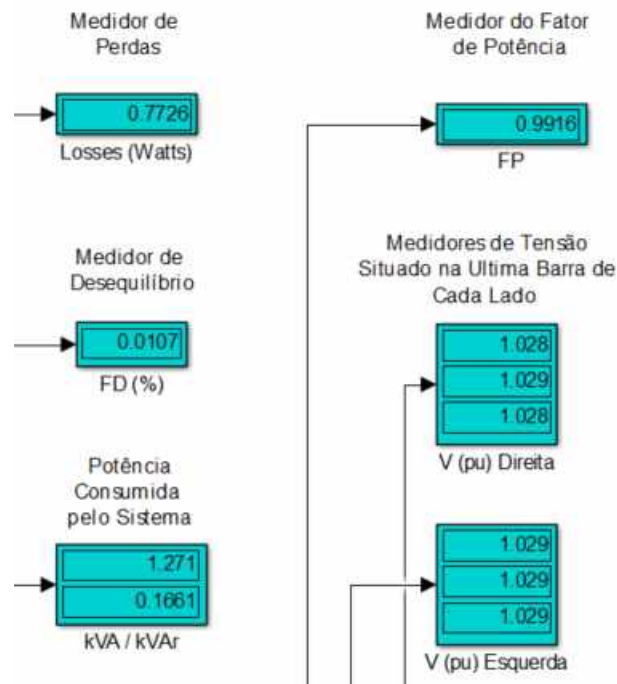


Figura 32 – Dados obtidos na simulação com as luminárias LED.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSÃO

Para a conclusão, foi feita uma tabela, para com intuito de facilitar a comparação dos dados para a conclusão deste trabalho.

	Lâmpadas VS (100W)	Lâmpadas VM (400W)	Lâmpadas LED (50W)
Perdas	3.81 W	59.43W	0.7726W
Desequilíbrio	2.188%	9.37%	1.07%
Potência Consumida	2.531 kVA	9.779kVA	1.271kVA
Fator de Potência	0.9683	0.8975	0.9916
Tensão na barra final a direita	1.025 pu	1.004 pu	1.028 pu
Tensão na barra final a esquerda	1.027 pu	1.008 pu	1.029 pu
Valor Máximo da Corrente	11.41 A	44.96 A	4.519A

Tabela 4 – Dados retirados das simulações.

Analisando os dados fica claro que quanto maior a potência das luminárias maior a corrente demandada para alimentação das mesmas, causando assim uma maior perda nas linhas, portanto a luminária com maior potência demandada e consequentemente a que causa menor perda nas linhas é a luminária de LED.

Esta mesma luminária causa a menor taxa de desequilíbrio na rede que é quase 10 vezes menor do que o desequilíbrio causado pelas lâmpadas VM. Além de seu fator de potência ser o mais próximo de 1pu fazendo com que as distribuidoras, possam se preocupar um pouco menos com alguns fatores da qualidade de energia elétrica.

Mesmo com todos esses pontos positivos para com a luminária de LED, visto até agora que é a melhor entre as três, há um aspecto que preocupa a troca desenfreada, sem estudos, dessas lâmpadas que são as tensões medidas no final da

rede. Mesmo que o aumento seja baixo, com este estudo não é capaz de se afirmar se uma troca em massa para esse tipo de luminária não cause um problema de sobretensão nos finais da linha.

Após, feito um estudo que vise as tensões nos finais da linha, fica claro a melhora que a troca para LED traz para todas as frentes no qual esse assunto diz respeito, sendo elas:

- A distribuidora de energia: pois esta terá uma menor perda na rede de distribuição e menor preocupação com a qualidade da energia que chega nos seus consumidores.
- A população: como mencionado antes, a qualidade da iluminação da luminária LED é muito superior as outras, dando uma sensação de maior claridade ao ambiente, trazendo assim segurança nas vias, além do realce das reais cores da cidade durante o período noturno.
- Às cidades: que equipadas com uma luminária com maior qualidade de iluminação, apresentarão uma maior beleza noturna, podendo assim estimular o turismo. Além do que essa nova realidade remete diretamente ao incremento da segurança para a população.

Portanto, dentre todas as tecnologias comercializadas, as luminárias de LED são as de melhor qualidade de acordo com o que foi apresentado neste estudo. Qualidade essa que reflete no custo dessas luminárias, visto que as mesmas tem os preços mais altos do mercado.

## 6. REFERÊNCIAS

CEMIG. **ND-3.1 Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas.**

Disponível em: <[https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd3\\_1\\_000001p.pdf](https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd3_1_000001p.pdf)>

Acessado em: 21 de maio de 2021

CEMIG. **ND-2.7 Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Isoladas.**

Disponível em: <[https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd\\_2\\_7-1.pdf](https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd_2_7-1.pdf)>

Acessado em: 21 de maio de 2021

MACÊDO, José Rubens. **Relatório Técnico 10|2020. Espectro harmônico das lâmpadas utilizadas para iluminação pública.**

Site : < <https://www.mundodaeletrica.com.br/>>



## APÊNDICE A – ESQUEMA COMPLETO DA SIMULAÇÃO NO SIMULINK

