



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

JOÃO PAULO SOUZA DIAS

**ANÁLISE DE VARIAÇÕES DE TENSÃO EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM AUXÍLIO DO
APLICATIVO PQA.**

Uberlândia
2018

JOÃO PAULO SOUZA DIAS

**ANÁLISE DE VARIAÇÕES DE TENSÃO EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM AUXÍLIO DO
APLICATIVO PQA.**

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

Orientador: Carlos Eduardo Tavares

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2018

Dedico este trabalho à Deus, aos meus pais,
pelo estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Carlos Eduardo Tavares pelo incentivo, motivação e orientação deste trabalho.

À Deus por me dar força, e coragem quando achei que não conseguia seguir em frente, à minha família, por me apoiar em todos os momentos, pela paciência e compreensão, aos meus amigos que estiveram sempre ao meu lado, e a todos os professores que fizeram parte do meu processo de graduação e me ajudaram a crescer como homem e como profissional.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem de sistemas de distribuição de energia elétrica, no que tange a qualidade da energia, usando como ferramenta o aplicativo computacional PQA, programa este desenvolvido em projeto de pesquisa e desenvolvimento realizado na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, com o propósito de simular sistemas elétricos de distribuição e podendo reproduzir situações que causem problemas referentes a qualidade da energia elétrica, incluindo variações de tensão de curta duração, e suas diversas causas, tais como curto-circuitos, partida de grandes motores, desligamento de cargas do sistema, além de fornecer análise de distorções harmônicas, desequilíbrios, fator de potência. Neste trabalho serão feitas simulações de sistemas de distribuição no referido aplicativo, mais especificamente sobre variações de tensão, com a apresentação de possíveis soluções também implementadas e simuladas, mostrando a potencialidade do PQA para solução e planejamento do sistema de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

This work deals with electrical energy systems, using an energy evaluation system, based on the PQA computational program, the research project and the technology training of the Federal University of Uberlândia. In order to simulate electrical types of electric power, including short-term voltage variations, and their automatic chains, such as starting circuits, large starters, shutdown of system loads, and provide analysis of harmonic distortions, imbalances, power factor. In Workflow, it performs application distribution system simulations, with a large number of voltage variations, with updates and simulation, showing a PQA problem solving potential for the electricity distribution system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Ponto de Vista do Consumidor.....	13
FIGURA 2 – Ponto de Vista do Concessionário.....	14
FIGURA 3 – Regiões da Tensão de Suprimento.....	16
FIGURA 4 – Forma de onda de uma interrupção momentânea de tensão	18
FIGURA 5 – Forma de onda de um afundamento momentâneo de tensão.....	19
FIGURA 6 – Forma de onda de uma elevação momentânea de tensão.....	19
FIGURA 7 – Origem das Variações de Tensão de Curta Duração.....	20
FIGURA 8 – Interface PQA.....	23
FIGURA 9 – Diagrama Unifilar do Sistema Utilizado.....	24
FIGURA 10 – Diagrama Unifilar utilizado no primeiro caso.....	26
FIGURA 11 – Dados da entrada do sistema utilizado.....	26
FIGURA 12 – Dados do Transformador utilizado no caso 1.....	27
FIGURA 13 – Parâmetros do Motor de Indução Trifásico utilizado.....	27
FIGURA 14 – Diagrama unifilar referente ao segundo caso.....	28
FIGURA 15 – Parâmetros da carga do segundo caso.....	28
FIGURA 16 –: Forma de onda da tensão elétrica na partida do motor.....	29
FIGURA 17 – Corrente elétrica durante a partida do motor.....	29
FIGURA 18 – Amplitude do afundamento médio de tensão nas fases A, B e C.....	30
FIGURA 19 – Diagrama Unifilar com a instalação do banco de capacitores.....	31
FIGURA 20 – Forma de onda da tensão com a instalação do banco de capacitores.....	32
FIGURA 21 – Corrente elétrica após a instalação do banco de capacitores.....	32
FIGURA 22 – Comprovação da eliminação completa do VTCD	32
FIGURA 23 – Diagrama Unifilar utilizado no segundo caso.....	34
FIGURA 24 –Tensão de regime permanente antes da instalação dos equipamentos.....	34
FIGURA 25 – Comprovação da existência de DRP e DRC.....	35
FIGURA 26 – Novo transformador de distribuição conectado ao sistema.....	35
FIGURA 27 – Novos cabos de baixa tensão instalados no sistema.....	36
FIGURA 28– Tensão de regime permanente dentro da faixa adequada.....	36
FIGURA 29– Tensão de regime permanente dentro da faixa adequada.....	37
FIGURA 30– Eliminação completa dos problemas de DRP e DRC.....	37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.....	21
TABELA 2 – Estratificação das VTCD's.....	21
TABELA 3 – Fator de ponderação para as regiões de sensibilidade.....	22
TABELA 4 – Dados do Sistema de Distribuição Utilizado.....	25
TABELA 5 – Variação da carga ao longo do dia.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Amperes

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DRC – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Coletiva

DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária

FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica

Fhi – Fator de harmônica de corrente

Fht – Fator de harmônica de tensão

Fp – Fator de Potência

I – Corrente

PQA – *Power Quality Analyzer*

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

t – Tempo

RMS – *root mean square*

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

V – Tensão

VTCD – Variação de tensão de curta duração

VTLD – Variação de tensão de longa duração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	13
3 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO.....	15
4 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO.....	18
5 METODOLOGIA.....	23
5.1 SOFTWARE PQA.....	23
5.2 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO.....	24
5.3 APRESENTAÇÃO DOS CASOS ANALISADOS.....	25
6 RESULTADOS.....	29
6.1 CASO 1- VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO.....	29
6.2 CASO 2- VARIAÇÃO DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO.....	33
7 CONCLUSÕES.....	38
8 REFERÊNCIAS.....	39

1 – INTRODUÇÃO.

A energia elétrica, é sem dúvida alguma, um dos recursos mais importantes que existem atualmente, sem ela as pessoas teriam menos conforto e segurança, a produção industrial estaria severamente comprometida, e os avanços tecnológicos teriam enormes dificuldades para seu desenvolvimento.

Sendo um bem tão precioso, a energia elétrica tem seu valor agregado, para que todos possam desfrutar dela, e estarem conectados com o mundo moderno. A partir do momento em que a energia elétrica é tratada como um produto, e vendida como tal, seus consumidores tem seus direitos que devem ser preservados, e estes, exigem cada vez mais um produto de qualidade e serviço que garanta a continuidade do fornecimento e a confiabilidade do sistema.

Com o avanço da engenharia moderna, surgiu uma necessidade latente do estudo sobre qualidade da energia elétrica, estudo esse que consiga abordar todos os aspectos que envolvam a qualidade da energia, seja na qualidade do produto em si, ou seja, a qualidade da tensão de suprimento; seja na qualidade do serviço prestado pela empresa responsável pelo suprimento da energia elétrica.

Neste trabalho, será feita uma abordagem sobre os indicadores de qualidade da energia elétrica, mais precisamente sobre a qualidade do produto, de acordo com o que as normas atuais exigem/recomendam [1]. Para tanto, será feito o uso do *Software PQA*, que é uma ferramenta computacional poderosa, desenvolvida por pesquisadores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a empresa Energisa SA [1]. Este tem como objetivo principal a simulação de sistemas elétricos de distribuição, contemplando os indicadores de qualidade da energia, permitindo simular condições adversas que podem ocorrer no dia-a-dia nos sistemas elétricos de potência em geral, e que causam perturbações na rede elétrica, como por exemplo: curto-circuitos, descargas atmosféricas, energização de máquinas, sobrecargas, entre outros, além de possibilitar a análise técnica dos impactos ocasionados por tais eventos. Para ilustrar a potencialidade do PQA, este trabalho está focado na simulação de perturbações na rede elétrica e possíveis soluções no tocante às variações de tensão.

2 - QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.

O termo qualidade da energia elétrica, refere-se a qualquer desvio que venha a ocorrer na magnitude, forma de onda, ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica [3].

Sabe-se que a energia, é o produto da tensão pela corrente, pelo tempo. Sendo o tempo, uma variável não controlável, e sabe-se também que a corrente elétrica, tem seu comportamento determinado pela carga, restando apenas a tensão como única variável de controle de qualidade, portanto, a qualidade da energia, refere-se de fato, a uma boa qualidade da tensão de suprimento, e esta deve ser senoidal, e de frequência e magnitudes constantes [4].

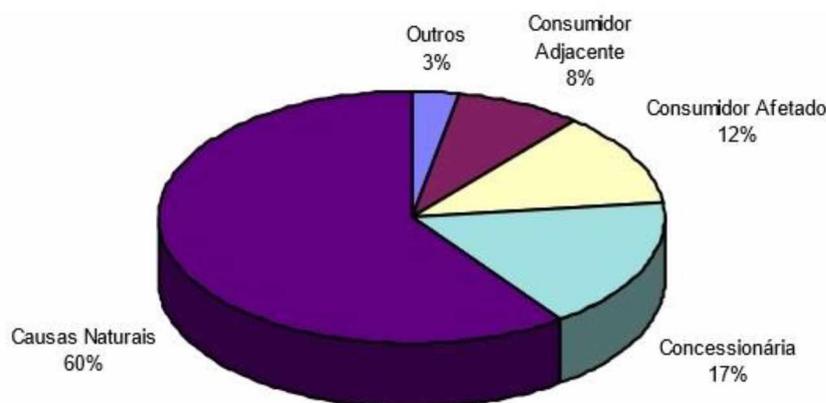
No entanto, vale ressaltar, que a corrente elétrica, possui uma relação direta com a tensão, o que muitas vezes torna indispensável, a investigação da mesma, para a melhoria dos indicadores de qualidade da energia elétrica [4].

Esta nomenclatura também se aplica aos fenômenos de natureza permanente ou transitória, que comprometem o desempenho do sistema elétrico seja na transmissão, ou na distribuição da energia elétrica [4].

As origens dos problemas referentes a qualidade da energia elétrica, podem causar conflitos, uma vez que nem sempre é simples verificar a existência do problema, e mais complexo ainda, é identificar o responsável pelo mesmo.

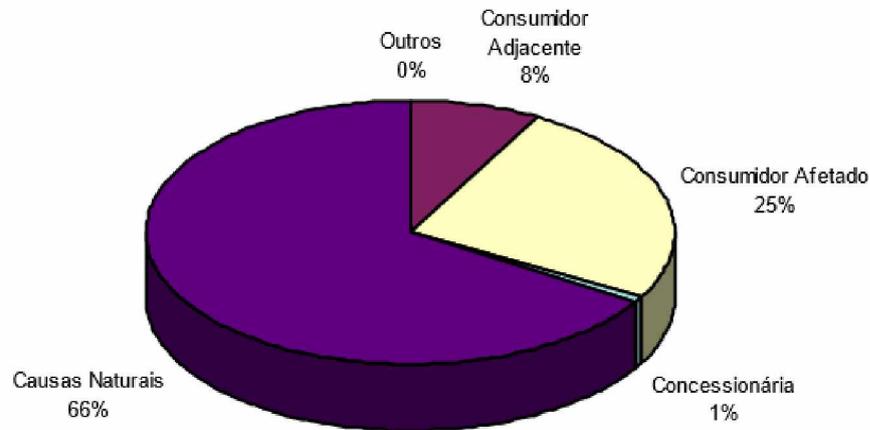
A seguir, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2, são apresentados dois gráficos, o primeiro com o ponto de vista do consumidor a respeito das origens dos problemas referentes a qualidade da energia elétrica, e o segundo remete o ponto de vista das concessionárias de energia.

Figura 1: Ponto de vista do Consumidor [4].



Fonte: Apostila de Qualidade da Energia Elétrica, versão 2015, Nunes, S. Ivan [4].

Figura 2: Ponto de vista da concessionária [4].



Fonte: Apostila de Qualidade da Energia Elétrica, versão 2015, Nunes, S. Ivan [4].

Visto isso, torna-se necessário o desenvolvimento de mecanismos apropriados para que os possíveis conflitos no que tange a responsabilidade dos agentes envolvidos, em um eventual comprometimento da qualidade da energia elétrica, sejam diminuídos.

Atualmente, nota-se um aumento na preocupação por parte dos consumidores, concessionárias e órgãos reguladores, em relação aos indicadores de qualidade da energia elétrica. Este aumento se justifica devido às seguintes razões [4]:

- 1) Elevado uso de equipamentos de controle microprocessados e dispositivos baseados em eletrônica de potência, equipamentos estes que são sensíveis à perda da qualidade do suprimento, e em contraponto estes dispositivos, são poluidores da rede de energia.
- 2) Aumento da importância de medidas relacionadas a racionalização e conservação energética, que são norteadas por uma alta eficiência, controle de velocidade de motores, chaveamento de banco de capacitores, para a melhora do fator de potência, e redução de perdas.
- 3) Os consumidores se mostram cada vez mais exigente, conhecedores de seus direitos, exigindo das concessionárias um produto cada vez com mais qualidade, e confiabilidade.
- 4) Crescimento da interconexão em rede dos processos industriais, fazendo que haja uma menor tolerância a falhas em componentes devido a perda da qualidade da energia, pois as consequências neste caso seriam mais severas.
- 5) Revisão das normas nacionais e internacionais, que tem se tornando mais rigorosas, estabelecendo limites, e penalizações para quem contribui para o comprometimento da qualidade da energia elétrica.
- 6) Aumento significativo da inserção de fontes renováveis de energia, baseados em vento e radiação solar, estas gerações, por terem variações

na potência gerada, e por possuírem dispositivos de controle, baseados em eletrônica de potência, podem causar problemas.

A qualidade da energia elétrica, propriamente dita, pode ser dividida em dois grandes temas, que são [1]:

- 1) A qualidade do serviço, que se refere ao serviço prestado pelas concessionárias, e estas se baseiam em indicadores como DIC, FIC, DMIC, DEC, FEC, que são calculados mensalmente, a cada trimestre, e anualmente, estes estão relacionados com a interrupção do fornecimento de energia elétrica, e neste contexto, vale ressaltar que os indicadores, são válidos apenas para períodos de longa duração (igual ou maior a 3 minutos).
- 2) A qualidade do produto, que se refere ao estudo da qualidade da energia fornecida, e neste contexto podemos citar alguns indicadores que são relevantes para a qualidade do produto, que são: transitórios eletromagnéticos, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, desequilíbrios de tensão, harmônicos, flutuação de tensão, variação de frequência.

Os Regulamentos do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica), Módulo 8, tem por objetivo, em termos de qualidade do produto, definir, as terminologias, os indicadores, caracterizar fenômenos, estabelecer limites, valores de referência, metodologia de medição, gerir as reclamações oriundas da conformidade da tensão de regime permanente, e às perturbações referentes a forma de onda da tensão, conforme apresentados na sequência [1].

Neste trabalho, especificamente, serão abordados os indicadores que se referem a qualidade do produto, com destaque para, as variações de tensão de curta duração, e também as variações de tensão de longa duração.

3 – VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO.

As variações de tensão de longa duração, podem ser definidas, como toda alteração do valor RMS da tensão, à frequência fundamental, em um intervalo superior a 3 minutos, descartando assim, as interrupções sustentadas de energia, as VTCD's, podem levar a duas possíveis situações: sub-tensão e sobre-tensão [4]. Dentre as principais origens das sobre-tensões, podemos citar [1]:

- Desconexão de grandes cargas.
- Conexão de banco de capacitores.
- Ajustes equivocados de tap's de transformadores.

As sub-tensões também têm suas origens conhecidas, dentre as quais, podemos citar:

- Carregamento excessivo de circuitos alimentadores.
- Conexão de grandes cargas a rede elétrica.
- Desconexão de banco de capacitores.
- Grande distância de alguns consumidores.

As variações de tensão de longa duração, tanto na forma de sobre-tensões quanto na forma de sub-tensões, causam prejuízos ao sistema elétrico, como falha em equipamentos. Embora alguns equipamentos não apresentem falhas imediatas quando são submetidos a sobre-tensões, quando os eventos são repetitivos, poderão ter sua vida útil reduzida. Estes equipamentos são [4]:

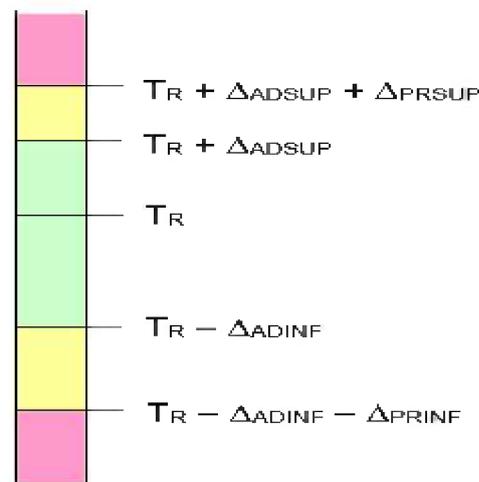
- Transformadores.
- Cabos.
- Disjuntores.
- TC's e TP's.
- Máquinas Rotativas.
- Relés de Proteção.

Da mesma forma que as sobre tensões, as sub-tensões, também tem seus efeitos conhecidos, dentre os quais podemos citar [4]:

- Redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores;
- Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores e controladores eletrônicos;
- Elevação do tempo de partida das máquinas de indução, o que contribui para a elevação de temperatura dos enrolamentos;
- Aumento nos valores das correntes do estator de um motor de indução quando alimentado por uma tensão inferior à nominal. Desta forma, tem-se um sobreaquecimento da máquina, o que certamente reduzirá a sua expectativa de vida útil.

Os níveis de tensão adequados, precários e críticos, para tensões em regime permanente, são definidos pelo PRODIST [1], e estes serão apresentados na Figura 3.

Figura 3: Regiões da Tensão de Suprimento [1].



Fonte: PRODIST Módulo 8, 2017 [1].

A Figura 3, refere-se aos níveis de tensão definidos pelo PRODIST, estas regiões que são indicadas por cores, mostram que a região verde, é a zona de tensão adequada, com TR sendo a tensão de referência. As regiões de cor amarela, são conhecidas como regiões de tensão precária, seja em afundamento, ou em elevação. Já as regiões em cor rosa, são conhecidas como região de tensão precária.

Os indicadores individuais e coletivos, são baseados em uma determinada quantidade de leituras, neste caso, 1008 leituras válidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, após coletadas as leituras, é feito um cálculo matemático para a determinação, dos chamados DRP, e DRC, que nos trazem a porcentagem na qual a tensão se transgrediu a região precária (DRP), e para a região crítica (DRC), abaixo serão apresentadas a base de cálculo para que sejam determinados estes indicadores, as equações 1 e 2, refere-se aos indicadores individuais, e as equações 3 e 4 aos indicadores coletivos, sendo que os parâmetros nlp e nlc , representam o maior número entre fases, do número de leituras situadas entre as faixas precárias e críticas, respectivamente [1].

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

$$DRP_E = \sum \frac{DRP_i}{N_L} [\%] \quad (3)$$

$$DRC_E = \sum \frac{DRC_i}{N_L} [\%] \quad (4)$$

Nas equações 3 e 4, o indicador N_L , refere-se ao número total de unidades consumidoras objetos de medição.

De acordo com o PRODIST, o limite máximo para o indicador DRP, é de 3%, e o limite para o indicador DRC é 0,5%, estes limites tratam de cada unidade consumidora, e se por algum motivo estes limites não forem atendidos, a concessionária deverá pagar multa ao consumidor [4].

Como na maioria dos problemas de engenharia, existem algumas soluções possíveis para serem implementadas com o propósito de mitigar o problema das variações de tensão de longa duração, dentre as quais podemos citar [4]:

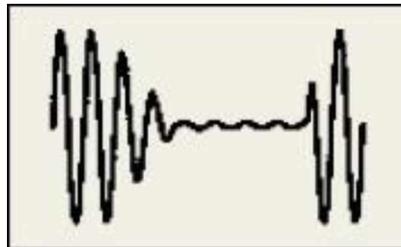
- Redimensionamento de transformadores.
- Instalação de reguladores de tensão.
- Instalação de capacitores *shunt* (paralelo).
- Redimensionamento de cabos.

4 - VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO.

As variações de tensão de curta duração (VTCD's), conceitualmente, podem ser definidas como sendo desvios significativos, no valor eficaz da tensão, em intervalos de tempo inferior a 3 minutos [2]. Estas alterações podem ser tanto de afundamento, quanto de elevação, e também podem ser interrupções.

É definido como interrupção momentânea de tensão (IMT), o evento em que o valor eficaz da tensão é inferior a 0,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração inferior ou igual a 3 (três) segundos. A forma de onda de uma IMT é apresentada na Figura 4 [6].

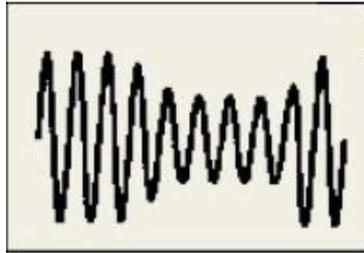
Figura 4: Forma de onda de uma interrupção momentânea de tensão [6].



Fonte: Moreira Maia, R. Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia [6].

O afundamento momentâneo de tensão (AMT) é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal com duração superior ou igual a um ciclo (16,67 ms) e inferior ou igual a três segundos. A Figura 5, apresenta a forma de onda típica de um afundamento médio de tensão [6].

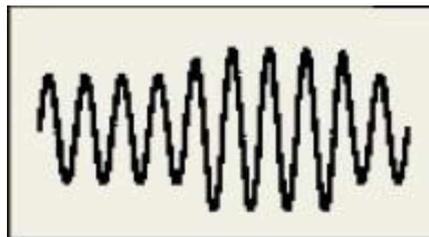
Figura 5: Forma de onda de um afundamento momentâneo de tensão [5].



Fonte: Moreira Maia, R. Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia [6].

A elevação momentânea de tensão (EMT) é o evento em que o valor eficaz da tensão é superior a 1,1 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo semelhante ao do AMT. A forma de onda de uma EMT é apresentada na Figura 6 [6].

Figura 6: Forma de onda de uma elevação momentânea de tensão [6].



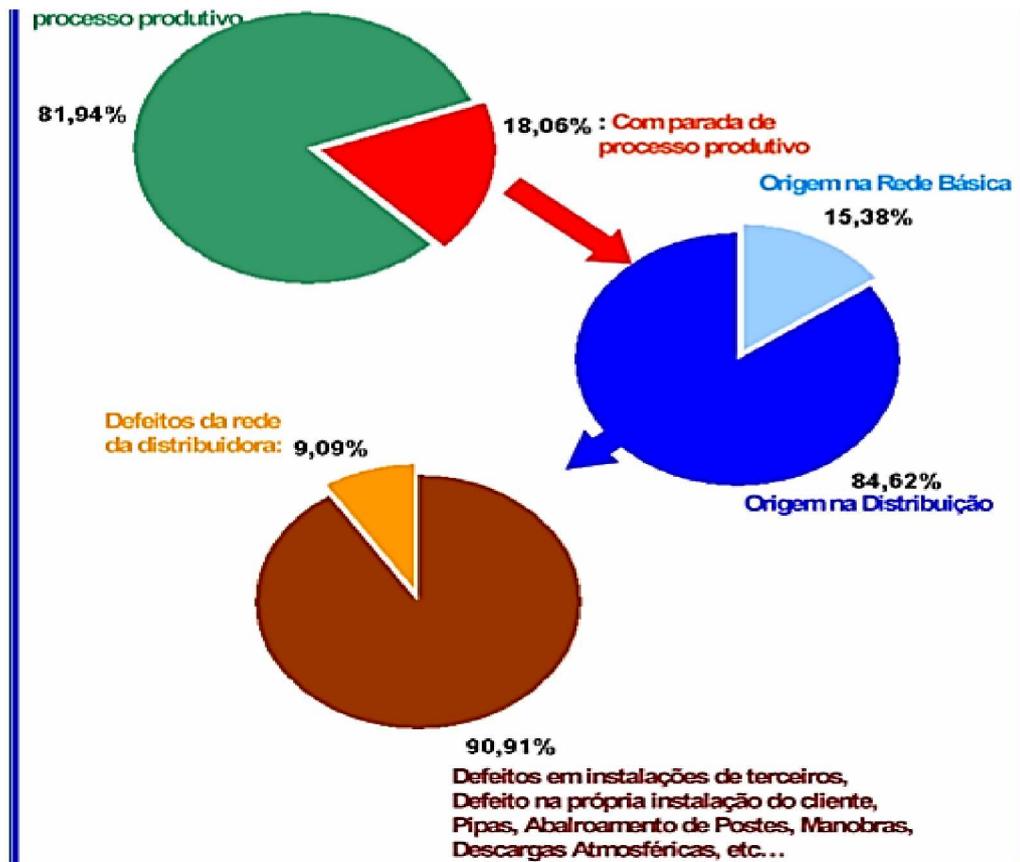
Fonte: Moreira Maia, R. Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia [6].

Com o avanço dos estudos relacionados à qualidade da energia elétrica, mais precisamente, sobre as variações de tensão de curta duração, hoje é possível identificar as causas destes eventos, dentre as principais podemos citar [4]:

- São tipicamente causados por faltas (curto-circuitos).
- Rejeição de cargas.
- Partida de motores.
- Energização de banco de capacitores.

A Figura 7 indica a origem dos eventos, e a sua relação com o processo industrial.

Figura 7: Origem das Variações de Tensão de Curta Duração [4].



Fonte: Apostila de Qualidade da Energia Elétrica, versão 2015, Nunes, S. Ivan [4].

Na Tabela 1, é apresentada a classificação dos VTCD's, segundo definição elaborada pelo PRODIST [1].

Tabela 1: Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração [1].

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST Módulo 8, 2017 [1].

A Tabela 2, representa a estratificação dos VTCD's, com relação a sensibilidade das mais diversas cargas presentes no sistema elétrico.

Tabela 2: Estratificação das VTCD's [1].

Amplitude (pu)	Duração					
	[16,67 ms - 100 ms]	[100 ms - 300 ms]	[300 ms - 600 ms]	[600 ms - 1 seg]	[1 seg - 3 seg]	[3 seg - 1 min]
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I		
(1,10 - 1,15]	REGIÃO H			REGIÃO I		
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A					
(0,80 - 0,85]	REGIÃO A					
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO G		
(0,60 - 0,70]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C	REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,40 - 0,50]	REGIÃO C	REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E			REGIÃO F		
(0,20 - 0,30]	REGIÃO E			REGIÃO F		
(0,10 - 0,20]	REGIÃO E			REGIÃO F		
< 0,10	REGIÃO E			REGIÃO F		

Fonte: PRODIST Módulo 8, 2017 [1].

O método de cálculo do fator de impacto para cada região é definido conforme Equação 5 [1].

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^J (f_{ei} \times fp_i)}{FI_{BASE}} \quad (5)$$

Sendo:

f_{ei} = frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apuradas por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I .

fp_i = fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração.

FI_{BASE} = Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 (trinta) dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

O fator de ponderação para cada região de sensibilidade, e o fator de impacto simples, são indicados na Tabela 3 [1].

Tabela 3: Fator de ponderação para as regiões de sensibilidade [1].

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (fp)	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Fonte: PRODIST Módulo 8, 2017 [1].

As variações de tensão de curta duração, assim como os demais problemas relacionados a qualidade da energia elétrica, causam perturbações nos equipamentos elétricos conectados à rede elétrica. No caso de afundamentos ou interrupções, podem causar mau funcionamento destes equipamentos. No caso de elevações de tensão, os equipamentos podem ser levados a danos irreparáveis (queima) [4].

Assim como nos demais problemas relacionados aos indicadores de qualidade da energia elétrica, existem estratégias para mitigar a severidade dos VTCD's, na rede elétrica, dentre as quais podemos citar [4]:

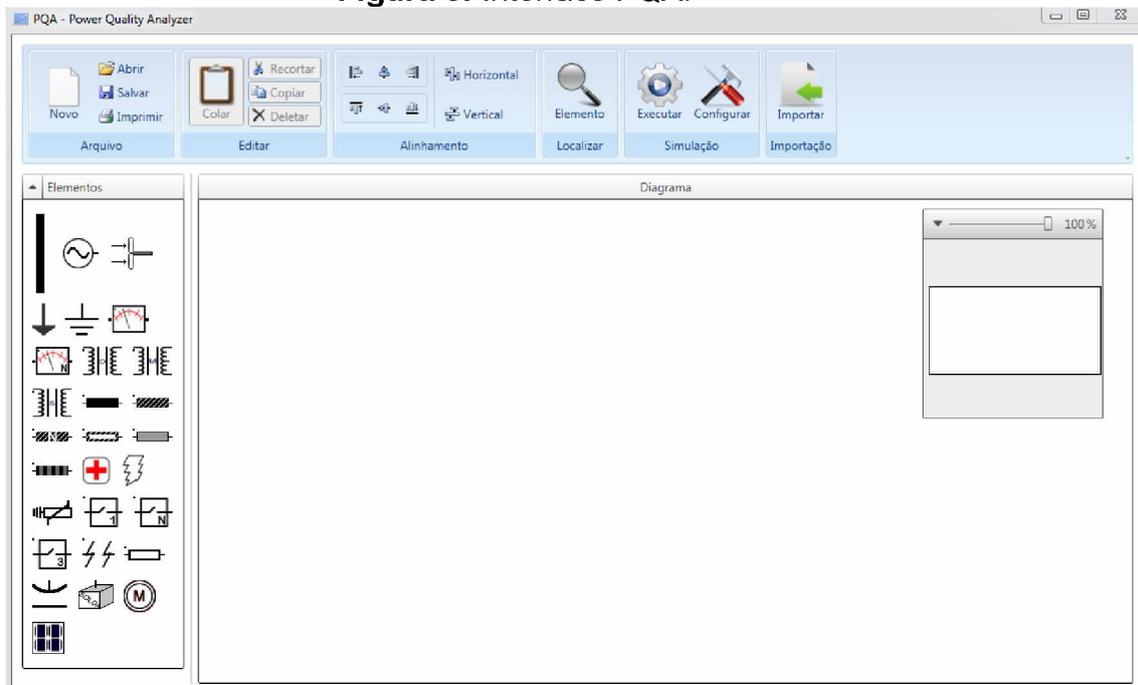
- Redução do número de faltas no sistema de potência.
- Aumento das frequências de manutenção das redes elétricas.
- Redução do tempo de extinção da falta.
- Uso de Dispositivos de partida em grandes motores.
- Instalação de Equipamentos de Mitigação.

5- Metodologia.

5.1 - Software PQA.

A metodologia utilizada para o trabalho baseou-se no *software* PQA (*Power Quality Analyzer* – Analisador de Qualidade de Energia) desenvolvido pelo grupo de Qualidade de Energia Elétrica – QEE da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Dentre as várias ferramentas disponibilizadas pelo PQA, o mesmo permite a simulação de cargas perturbadoras não lineares e a avaliação da injeção de harmônicos, e outras consequências, em um sistema elétrico. A interface gráfica do PQA foi desenvolvida na linguagem C# sendo esta composta por área para edição e montagem do circuito elétrico da rede de distribuição. Nela todos os comandos são dispostos de forma direta e prática onde o usuário visualiza facilmente os instrumentos ou opções de trabalho e, através do clique do mouse nos componentes da barra de ferramentas e, posterior clique na área de desenho, efetua-se a montagem do sistema. Existe também a opção de importação da rede elétrica pelo sistema de dados dos *softwares* georeferenciados [3]. A Figura 8, apresenta a interface gráfica do PQA.

Figura 8: Interface PQA.



Fonte: Próprio autor.

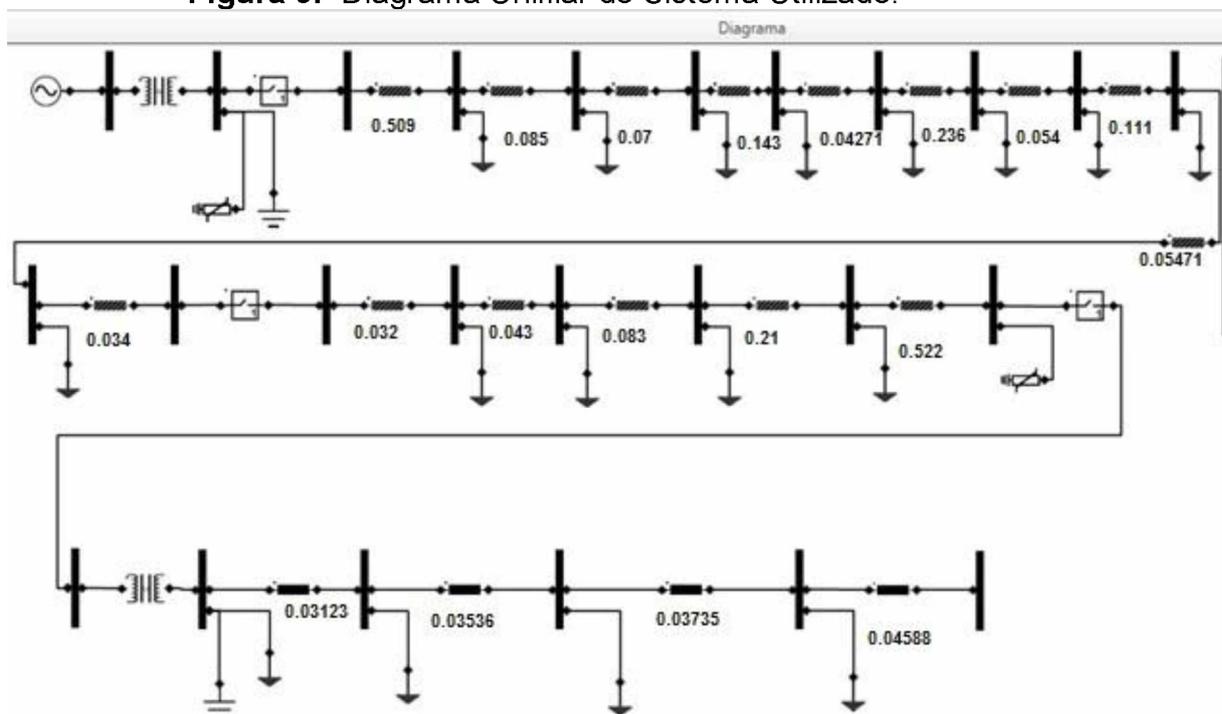
Para a montagem do sistema ou diagrama unifilar, são disponibilizados componentes como: cabos condutores de energia, fonte de tensão banco de capacitores, transformadores, cargas de potência ativa e reativa, distúrbios, medidor de qualidade de energia elétrica, consumidor, dispositivos de manobra e proteção como disjuntor chave-fusível e para-raios.

Na montagem do sistema em cada componente podem ser inseridos dados de acordo com os equipamentos selecionados como no caso de fonte de tensão, para-raios e transformadores.

5.2 – Apresentação do sistema utilizado.

Para a realização deste trabalho, foram analisados dois casos de estudo em um mesmo sistema elétrico de distribuição, sistema este baseado no diagrama elétrico proposto na referência [5], que foi elaborado considerando um sistema elétrico real. A Figura 9 apresenta o diagrama unifilar. As distâncias de cada trecho do sistema entre as barras foram indicadas abaixo dos condutores e estão representadas em quilômetros. Os demais dados técnicos são apresentados na Tabela 4.

Figura 9: Diagrama Unifilar do Sistema Utilizado.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4: Dados do Sistema de Distribuição Utilizado [5].

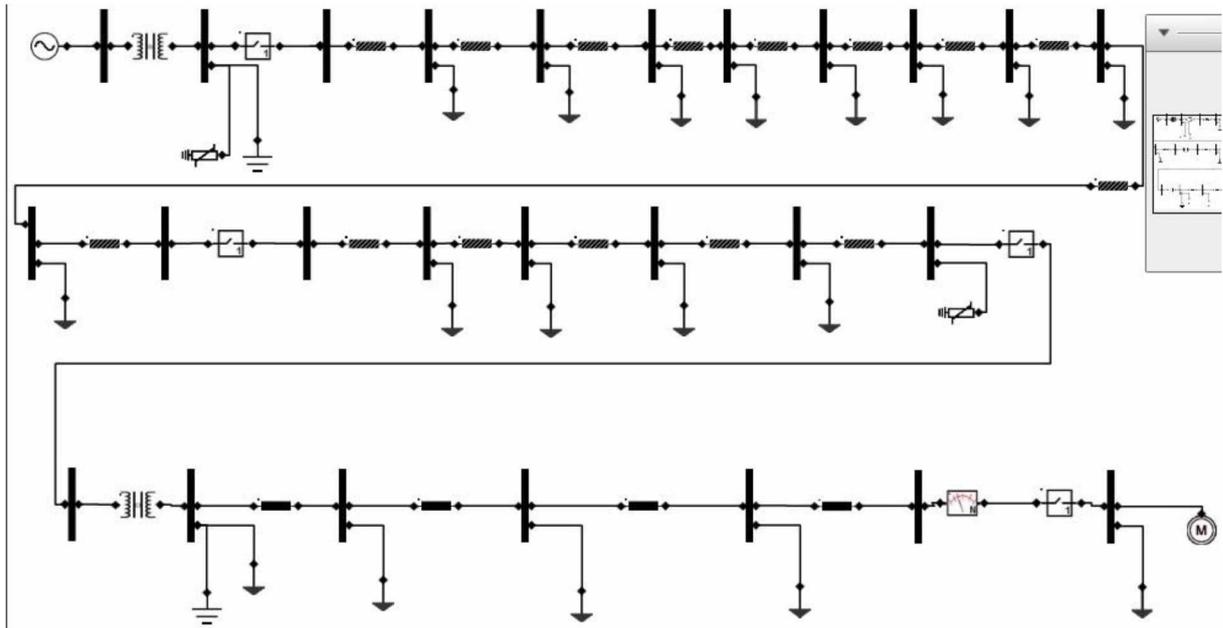
CONCESSIONÁRIA		
Tensão Nominal	138 kV	
Potência de curto-circuito	1925<78° MVA	
TRANSFORMADOR DA SE		
Potência	20 MVA	
Tensões AT/BT	138 / 13,8 kV	
Tipo de conexão	Delta-Estrela	
Reatância Indutiva	10,07%	
Resistência	0,45%	
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO		
Potência	75 kVA	
Tensões AT/BT	13,8 / 0,22 kV	
Tipo de conexão	Delta-Estrela	
Reatância Indutiva	3,15%	
Resistência	1,52%	
CONDUTORES	R_p(Ω/Km)	XL_p(Ω/Km)
Cabo CA XLPE 185 mm²	0,2806	0,2090
Cabo CA XLPE 70 mm²	1,7471	0,8699
Cabo CA XLPE 35 mm²	1,4772	0,5195

Fonte: Proposta de Condicionador de Ar Split Visando a Análise de Pedidos de Ressarcimento por Danos Elétricos. Oliveira Rezende, P.H [5].

5.3 – Apresentação dos casos analisados.

Após o sistema original ser devidamente implementado no aplicativo PQA, foram desenvolvidos dois casos para a análise. Para o caso 1, referente à variação de tensão de curta duração devido a partida direta de motores elétricos, foi inserido na última barra, um motor de indução trifásico de 5 cavalos junto com uma carga do tipo P+jQ, para reproduzir o comportamento pequena indústria durante a partida direta deste motor. O diagrama do sistema, e seus respectivos dados serão apresentados na Figura 10.

Figura 10: Diagrama Unifilar utilizado no primeiro caso.



Fonte: Próprio autor.

Para facilitar a simulação dos problemas propostos, optou-se por promover algumas modificações nos dados de nível de curto-circuito e do transformador de distribuição de forma a torna-lo mais sensível às perturbações. Os novos parâmetros são apresentados nas figuras 11, 12 e 13.

Figura 11: Dados da entrada do sistema utilizado.

Nome:

Tipo de Distúrbio	Geral
<input checked="" type="radio"/> Normal <input type="radio"/> VTCD <input type="radio"/> Flutuações de Tensão <input type="radio"/> Distorções Harmônicas <input type="radio"/> Desequilíbrio	Tensão Fase-Fase: <input type="text" value="138000"/> V Frequência: <input type="text" value="60"/> Hz SCC: <input type="text" value="200"/> MVA <input checked="" type="radio"/> Ângulo: <input type="text" value="0"/> Graus <input type="radio"/> X/R: <input type="text" value="0"/> <input type="checkbox"/> Medir corrente?

Fonte: Próprio autor.

Figura 12: Dados do Transformador utilizado no caso 1.



Nome: Transformador Distribuição

Parâmetros

Potência KVA	R %	X %
30	1	3.5

Tensões

Tensão Primária: 13.8 kV Tensão Secundária: 0.22 kV

Impedância de Aterramento

R (Ohms)	L (mH)
1E-06	0

Impedância da Malha de Terra

R (Ohms)	L (mH)

Capacitâncias

Primário-Carçaça:	Primário-Secundária:	Secundário-Carçaça:
0.002 μF	0.002 μF	4 μF

Banco de Dados

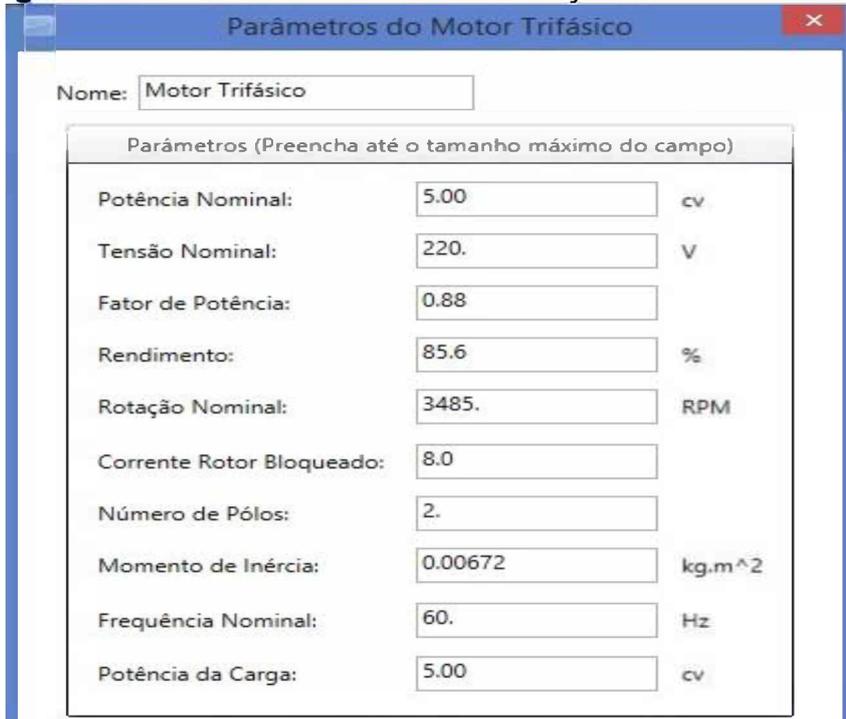
Trafo 30 kVA - aéreo

Outros Parâmetros

Freqüência: 60 Hz

Fonte: Próprio autor.

Figura 13: Parâmetros do Motor de Indução Trifásico utilizado.



Nome: Motor Trifásico

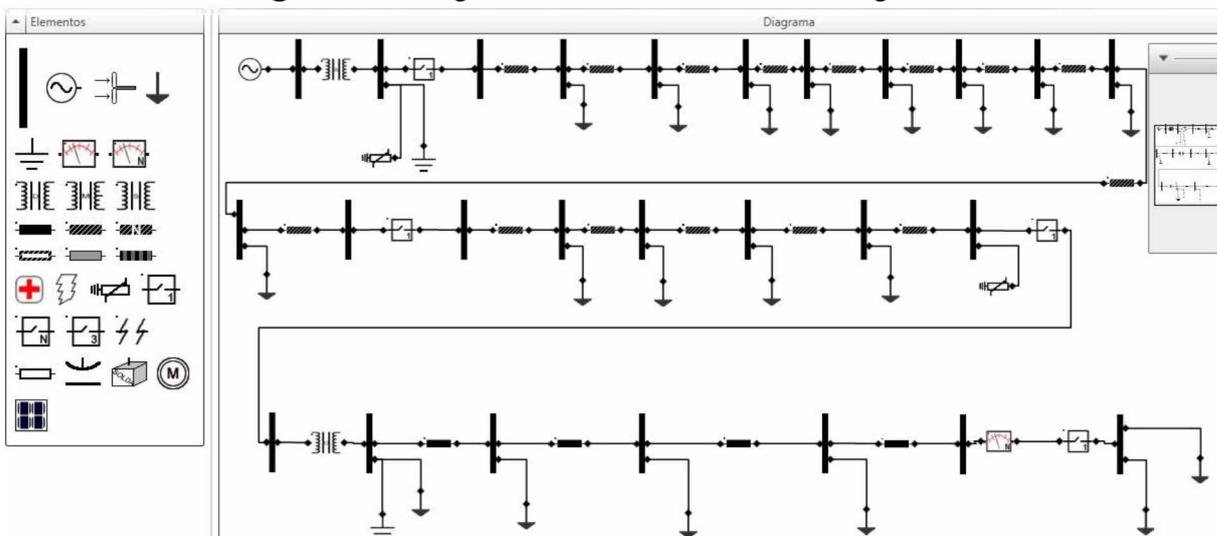
Parâmetros (Preencha até o tamanho máximo do campo)

Potência Nominal:	5.00	cv
Tensão Nominal:	220.	V
Fator de Potência:	0.88	
Rendimento:	85.6	%
Rotação Nominal:	3485.	RPM
Corrente Rotor Bloqueado:	8.0	
Número de Pólos:	2.	
Momento de Inércia:	0.00672	kg.m ²
Freqüência Nominal:	60.	Hz
Potência da Carga:	5.00	cv

Fonte: Próprio autor.

Para o caso 2, em que foram analisados os problemas referentes as variações de tensão de longa duração, como DRP e DRC, foram feitos mais alguns ajustes no sistema original. Neste caso, o motor de indução trifásico foi substituído por uma carga do tipo P+jQ, (cuja potência será apresentada adiante), utilizou-se também de um recurso do programa PQA em incorporar e simular a variação de carga de todo o sistema elétrico ao longo de 24 horas, o que permite analisar os problemas referentes às variações de tensão de longa duração. Desta forma, os dados referentes ao segundo caso, são apresentados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14: Diagrama unifilar referente ao segundo caso.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15: Parâmetros da carga do segundo caso.

Geral	
Nome:	Carga
Tensão Nominal:	220 V
Frequência:	60 Hz
Tipo de Configuração da Carga	
<input checked="" type="radio"/> Equilibrada	
P:	8 kW
Q:	2 kVAR
<input type="radio"/> Por fase	
A	P: 1E-06 kW
	Q: 0 kVAR
B	P: 1E-06 kW
	Q: 0 kVAR
C	P: 1E-06 kW
	Q: 0 kVAR

Fonte: Próprio autor.

Os demais dados referentes aos cabos, transformadores, dados de entrada do sistema, foram os mesmos utilizados no primeiro caso.

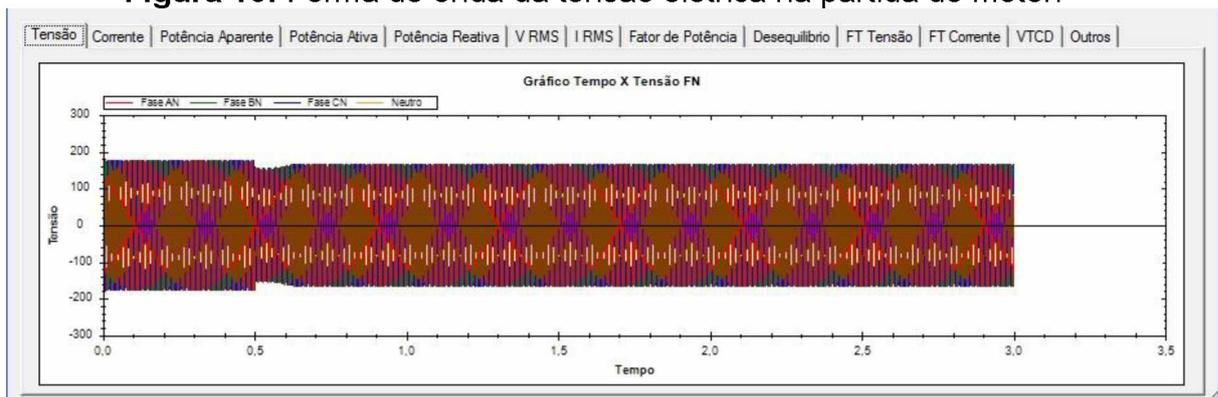
6 - Resultados.

6.1 Caso 1- Variação de Tensão de Curta Duração.

Como foi citado anteriormente, tanto o caso 1, quanto o caso 2, foram baseados em um mesmo sistema de distribuição de energia elétrica, e para a análise do caso 1, foi simulada a partida de um motor de indução trifásico em uma pequena indústria localizada no final da rede elétrica, ocasionando o VTCD.

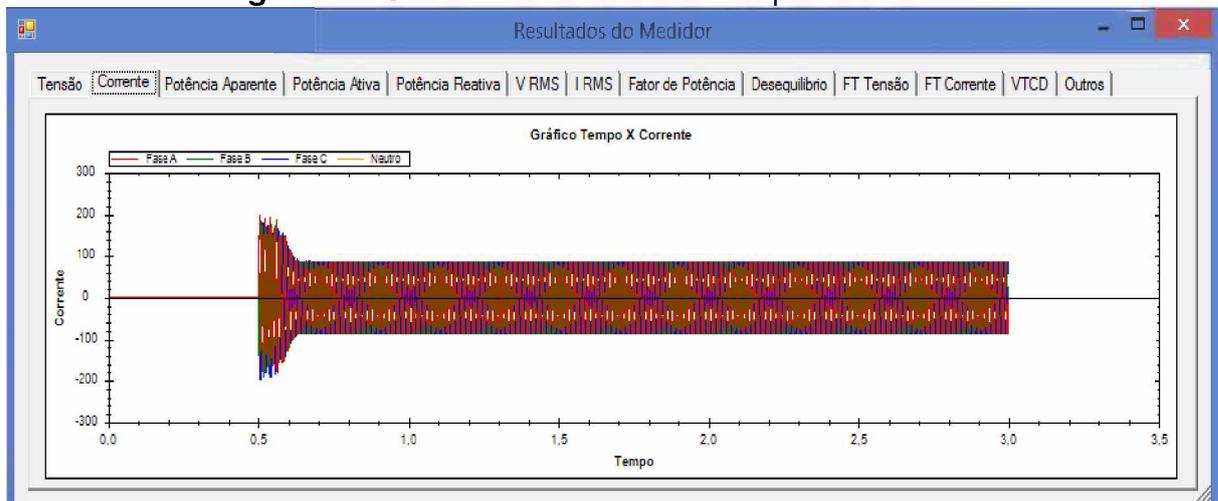
A Figura 16 e 17, mostram respectivamente a tensão e corrente instantâneas resultantes, sendo que a partida do motor foi realizada no instante de tempo igual a 0,5s da simulação. Percebe-se, pela análise da Figura 16 que a tensão sobre um afundamento no momento da partida do motor, e na Figura 17, nota-se uma elevada corrente durante a partida da máquina.

Figura 16: Forma de onda da tensão elétrica na partida do motor.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Corrente elétrica durante a partida do motor.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 18 apresenta os dados de duração e amplitude do VTCD, fornecidos como resultado do processamento da simulação no PQA.

Figura 18: Amplitude do afundamento médio de tensão nas fases A, B e C.

Tensão	Corrente	Potência Aparente	Potência Ativa	Potência Reativa	V RMS	I RMS	Fator de Potência	Desequilíbrio	FT Tensão	FT Corrente	VTCD	Outros
Variação de Tensão de Curta Duração												
Fase	Início (s)	Término (s)	Duração (s)	Máximo (V)	Mínimo (V)	Classificação	Amplitude (%)					
A	0,51646	0,61642	0,09995997	108,2944	108,2944	AMT	49,22474					
B	0,51646	0,61642	0,09995997	108,3389	108,3389	AMT	49,24495					
C	0,51646	0,61642	0,09995997	108,1984	108,1984	AMT	49,18109					
AMT	0,51646	0,61642	0,09995997				49,18109					
EMT												

Fonte: Próprio autor.

Dentre as possíveis soluções para a minimização do problema em pauta pode-se citar a utilização de dispositivos de partida para que a corrente do motor durante sua partida seja reduzida, tais como chave estrela-triângulo, chave compensadora, chave série-paralelo, *soft-starter*, inversor de frequência, etc. Contudo, objetivando utilizar os recursos do PQA, optou-se por uma solução menos praticada que é a instalação de banco de capacitores em paralelo. Embora o PQA tenha a facilidade de simulação para encontrar o valor do capacitor de forma empírica, optou-se por fazer os cálculos de forma a comparar com os resultados da simulação. Neste sentido, foram realizados cálculos simplificados conforme descrito a seguir:

Considerando foi utilizado o mesmo condutor desde o transformador até a carga, o comprimento total será de 0,15 Km. Portanto, a impedância total será:

$$Z = (1,747133 + j0,869933) \times 0,15$$

A impedância total será: $Z_{TOTAL} = 0,2927 \angle 26,46^\circ \Omega$

Para que a tensão esteja na faixa adequada, optou-se por uma queda de uma queda de tensão (ΔV) equivalente a 5%.

$$\Delta V = 127 \times 0,05 = 6,35V$$

Portanto, a corrente máxima (I) para que ocorra a desejada queda de tensão deverá ser:

$$Z = V \times I \text{ e portanto: } I = 6,35/0,2927 \angle 26,46^\circ = 21,89 A$$

Considerando que a corrente de partida do motor (I_P) é de 200A, conforme observado na Figura 17, e que a mesma seja predominante no sistema e, de

característica praticamente indutiva, pode-se, de forma simplificada obter o valor da corrente do capacitor (I_c) para compensação da corrente de partida:

$$I_c = I_P - I = 200 - 21,89 = 178,11A$$

Sabe-se que a potência reativa Q é dada por $Q = V \times I \times \sin(\Theta)$

onde Θ é o deslocamento angular entre tensão e corrente. Considerando que na partida do motor a corrente seja puramente reativa, pode-se considerar que $\Theta = 90^\circ$ e, portanto, a potência do capacitor (Q_c) para a compensação reativa será:

$$Q = V \times I \times \sin(\Theta) = V \times I \times 1$$

A tensão de fase na barra da carga, considerando a queda de tensão de 5% será $V_c = (220/\sqrt{3}) - 6,35 = 120V$, aproximadamente.

A potência do capacitor poderá ser obtida, portanto:

$$Q = V_c \times I_c \times 1 = 120 \times 178,11 \times 1 = 21373,2VAr$$

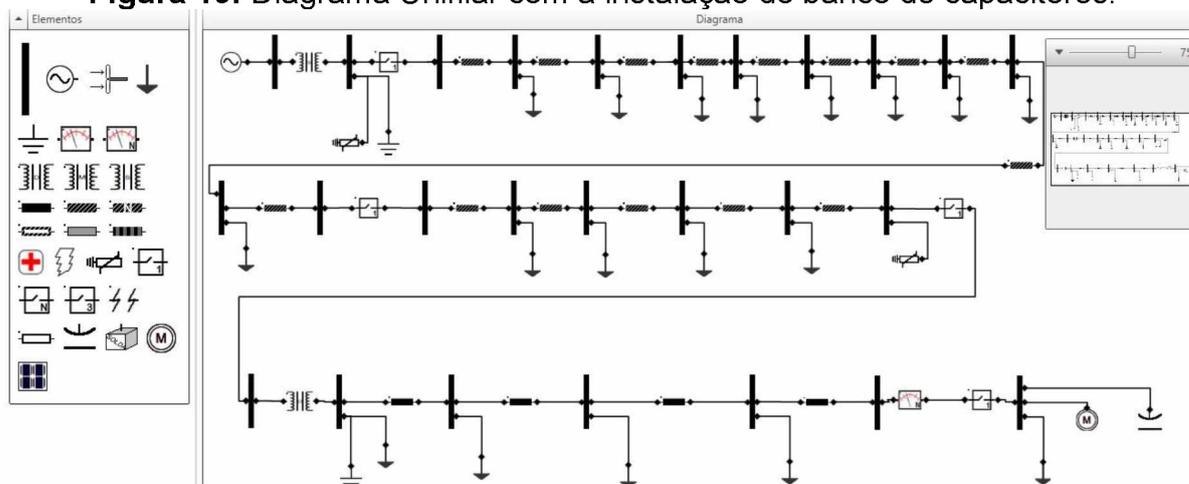
Para o banco trifásico, a potência do capacitor (Q_c) será:

$$Q_c = 2.1737,2 \times 3 = 64.119,6VAr$$

Dada as aproximações, optou-se por um acréscimo de 5% no valor do banco. Portanto, foi escolhida uma potência de 67kVAr para os estudos. O esperado é esta potência indique resultados satisfatórios quando obtidos pelas simulações computacionais.

A Figura 19 apresenta o sistema com o banco de capacitores conectado.

Figura 19: Diagrama Unifilar com a instalação do banco de capacitores.

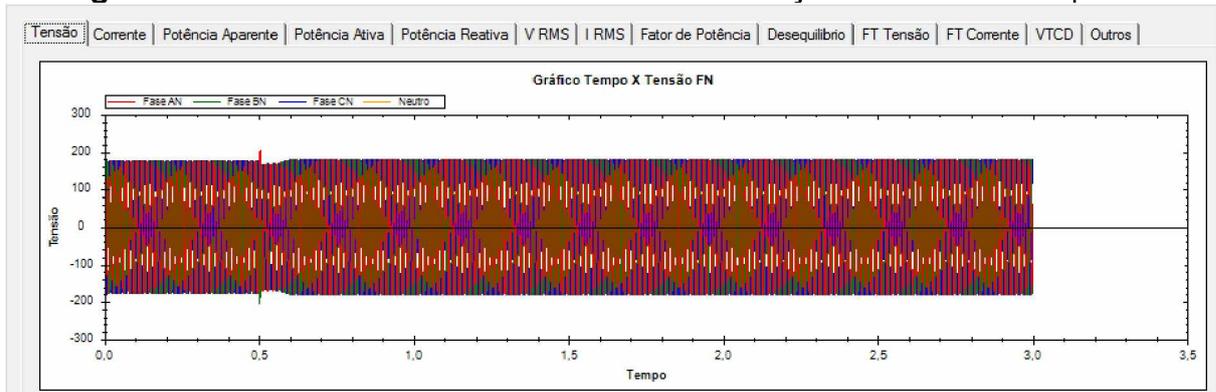


Fonte: Próprio autor.

As Figuras 20 e 21 mostram a redução dos impactos na tensão e na corrente da rede elétrica devido a partida do motor. Percebe-se que houve uma minimização

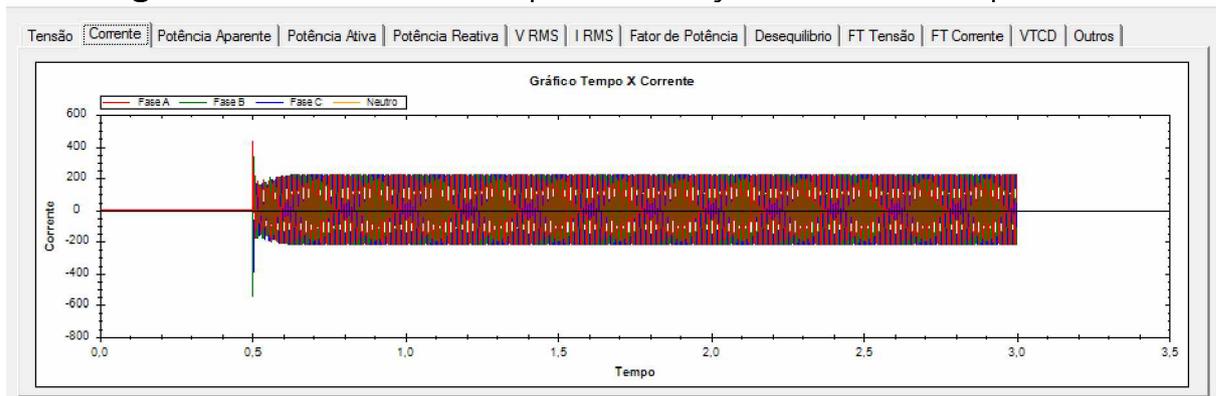
do distúrbio com a instalação do capacitor no sistema, e na Figura 22, o próprio PQA gera um relatório nulo sobre o VTCD, mostrando sua inexistência após a instalação do capacitor. Também pode-se observar que a resposta do PQA se mostrou em consonância com o comportamento esperado para o valor do capacitor calculado.

Figura 20: Forma de onda da tensão com a instalação do banco de capacitores.



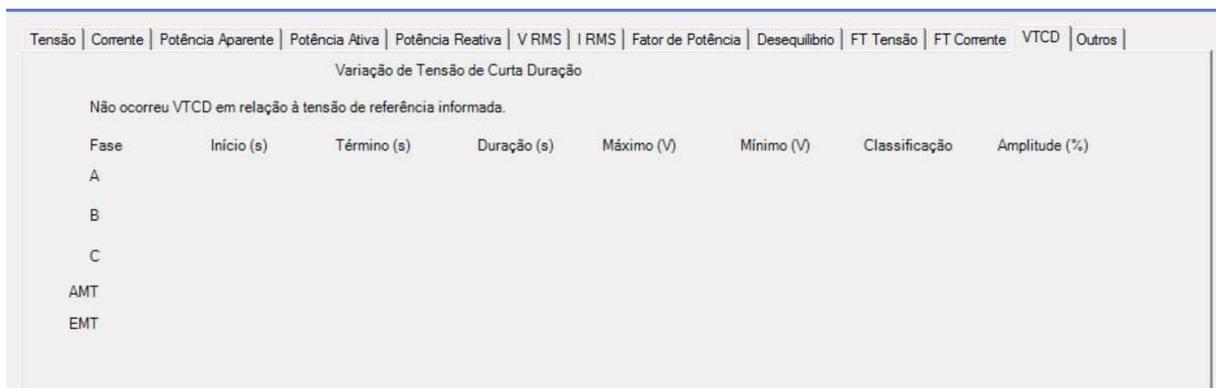
Fonte: Próprio autor.

Figura 21: Corrente elétrica após a instalação do banco de capacitores.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22: Comprovação da eliminação completa do VTCD.



Fonte: Próprio autor.

6.2 Caso 2- Variação de Tensão de Longa Duração.

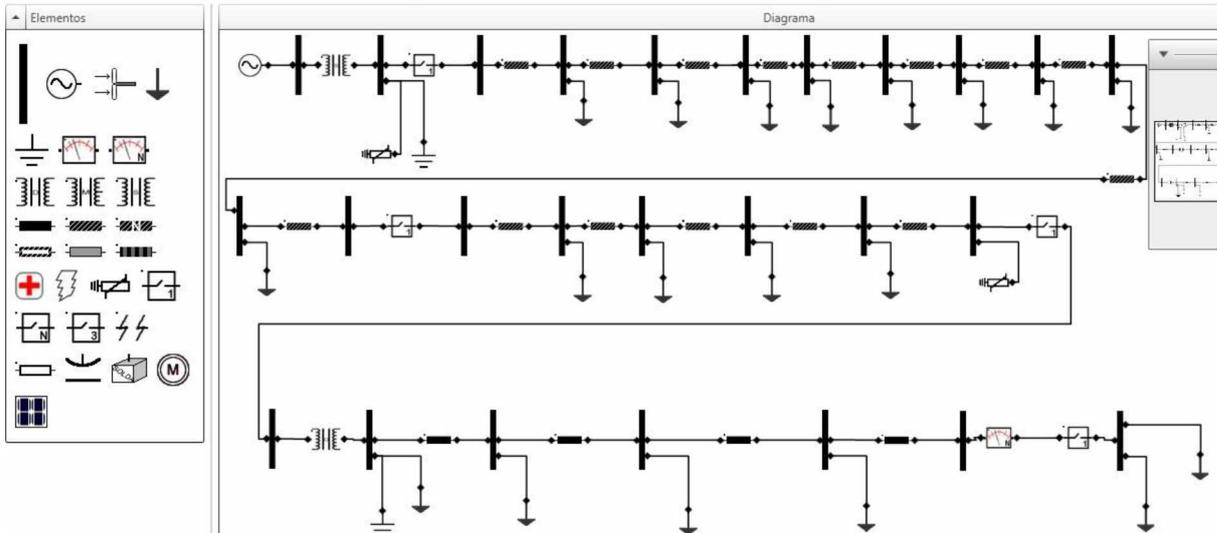
Para a simulação do caso 2 (VTLD), o sistema elétrico foi o mesmo apresentado anteriormente, porém, foi utilizado no lugar do motor, uma carga P+jQ, cujos dados estão na Figura 15. Para que se pudesse simular o fenômeno da variação de tensão de longa duração, foi implementada uma variação de carga do sistema ao longo de 24 horas, recurso esse existente no PQA. A Tabela 5 apresenta a variação da carga adotada, em pu, de todo o sistema elétrico ao longo das 24 horas

Tabela 5: Variação da carga ao longo do dia.

Hora do dia (Horas)	Variação da carga (P.U)
00:00	1.1
01:00	0.8
02:00	0.3
03:00	0.4
04:00	0.5
05:00	0.6
06:00	0.7
07:00	0.8
08:00	0.9
09:00	1.0
10:00	1.1
11:00	1.2
12:00	1.3
13:00	1.2
14:00	1.3
15:00	1.2
16:00	1.0
17:00	1.2
18:00	1.1
19:00	1.2
20:00	1.0
21:00	0.9
22:00	0.8
23:00	1.0

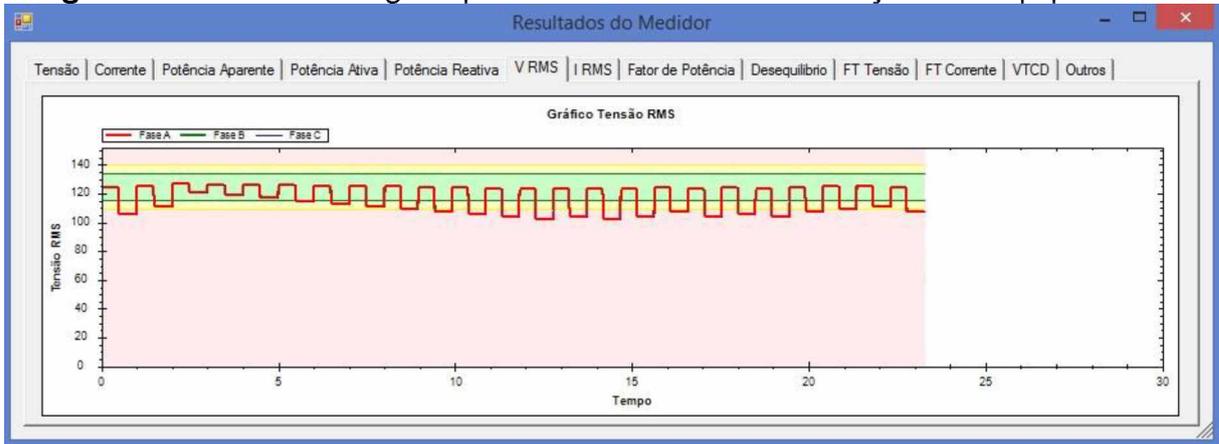
Fonte: Próprio autor.

Figura 23: Diagrama Unifilar utilizado no segundo caso.



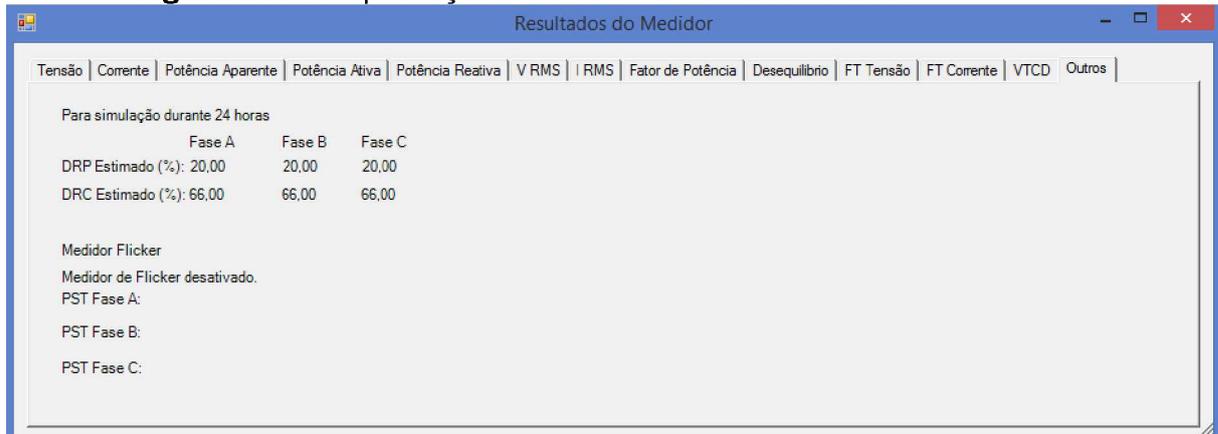
A Figura 24 apresenta o perfil da tensão eficaz resultante do processo de variação da carga ao longo das 24 horas do dia. Percebe-se que os níveis atingidos não são mantidos dentro da região adequada (área verde) ao longo das 24 horas, resultando nos índices de DRP e DRC estimados pelo PQA e apresentados no relatório mostrado na Figura 25.

Figura 24: Tensão de regime permanente antes da instalação dos equipamentos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25: Comprovação da existência de DRP e DRC.



Fonte: Próprio autor.

Nota-se pela Figura 25, que os indicadores DRP e DRC, estão bem acima dos limites estabelecidos pelo PRODIST, que são de 3% para DRP e 0,5% para DRC [1].

Para solucionar este problema, algumas alterações foram propostas para aumentar a robustez do sistema elétrico, na forma de melhorias como a troca do transformador de distribuição, dos cabos de baixa tensão, e a instalação de um banco de capacitores. As figuras 26, 27 e 28 apresentam os novos parâmetros adotados.

Figura 26: Novo transformador de distribuição conectado ao sistema.

Nome: Transformador Distribuição

Parâmetros		
Potência KVA	R %	X %
112,5	1	3,5

Banco de Dados
Trafo 112 kVA - aéreo

Outros Parâmetros
Frequência: 60 Hz

Tensões	
Tensão Primária:	13,8 kV
Tensão Secundária:	0,22 kV

Impedância de Aterramento		Impedância da Malha de Terra	
R (Ohms)	L (mH)	R (Ohms)	L (mH)
1E-06	0		

Capacitâncias		
Primário-Carçaça:	Primário-Secundária:	Secundário-Carçaça:
0,002 μ F	0,002 μ F	4 μ F

Fonte: Próprio autor.

Figura 27: Novos cabos de baixa tensão instalados no sistema.

Nome: Comprimento: km

Cabo Fase

Rp (Ohms/km)	Rm (Ohms/km)	XLp (Ohms/km)	XLm (Ohms/km)	Cp (μ F/km)	Cm (μ F/km)
<input type="text" value="1.174733"/>	<input type="text" value="0.1986333"/>	<input type="text" value="0.7775334"/>	<input type="text" value="0.4147333"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Cabo Neutro

Rp (Ohms/km)	Rm (Ohms/km)	XLp (Ohms/km)	XLm (Ohms/km)	Cp (μ F/km)	Cm (μ F/km)
<input type="text" value="1.174733"/>	<input type="text" value="0.1986333"/>	<input type="text" value="0.7775334"/>	<input type="text" value="0.4147333"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Banco de Dados:

Modelo PI

Rp (Ohms/km)	Rm (Ohms/km)	XLp (Ohms/km)	XLm (Ohms/km)	Cp (μ F/km)	Cm (μ F/km)
<input type="text" value="1.174733"/>	<input type="text" value="0.1986333"/>	<input type="text" value="0.7775334"/>	<input type="text" value="0.4147333"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Fonte: Próprio autor.

Figura 28: Parâmetros do banco de capacitores.

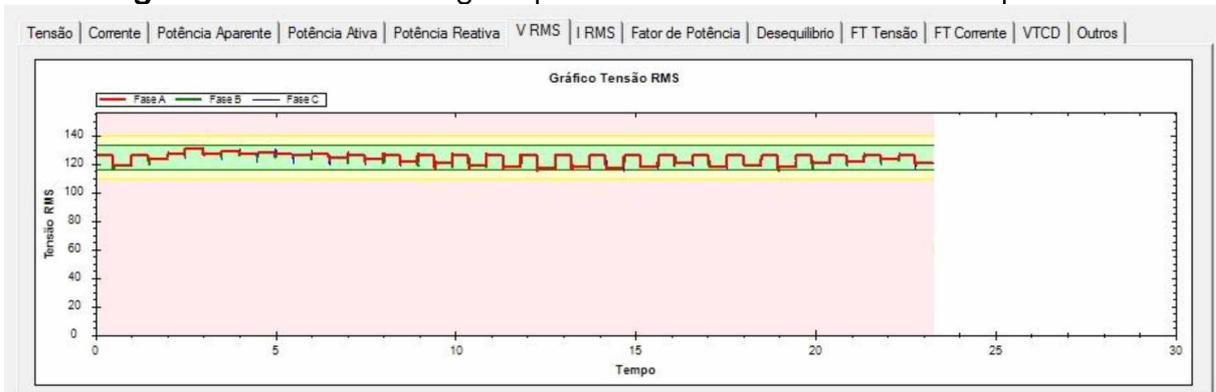
Nome:

Q (kVAR): Tensão Nominal (V):

Fonte: Próprio autor.

As figuras 29 e 30 apresentam os resultados obtidos após as alterações supracitadas.

Figura 29: Tensão de regime permanente dentro da faixa adequada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30: Eliminação completa dos problemas de DRP e DRC.



Fonte: Próprio autor.

Como nota-se nas figuras anteriores, as melhorias implementadas promoveram a mitigação do distúrbio, mostrando a grande potencialidade do PQA para avaliação de problemas e soluções para melhoria de redes elétricas.

7 – CONCLUSÕES.

As simulações realizadas neste trabalho puderam demonstrar que o *software* PQA é uma ferramenta extremamente útil no dia a dia dos engenheiros e técnicos que trabalham com Qualidade da Energia Elétrica.

Este programa, fornece a possibilidade de prever eventuais problemas com novas cargas a serem instaladas na rede de distribuição de energia elétrica, bem como testar possíveis soluções antes que o problema efetivamente ocorra na prática, poupando assim, tempo, recursos financeiros e humanos, além dos possíveis problemas com os órgãos reguladores.

Uma ferramenta poderosa como o PQA, ser capaz de poupar tais recursos, é muito importante para qualquer empresa de distribuição de energia elétrica que queira otimizar sua prestação de serviços e flexibilizar a relação com os seus clientes, já que os prováveis problemas relacionados a instalação de novas cargas solicitadas, serão previamente simuladas pelo *software* e explanados ao cliente, antes mesmo que seja feita a ligação na rede. Desta forma, evitam-se eventuais problemas e situações desagradáveis com os clientes, que sempre exigem rapidez e confiabilidade no produto que estão adquirindo, e o PQA, mostrou grande potencialidade para esta função.

8- REFERÊNCIAS.

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8, 2017.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill Companies, 2004.
- [3] SOUZA, A. C. ; TAVARES, C. E. . Análise das Distorções Harmônicas Geradas pelas Cargas não-lineares através do Aplicativo Computacional PQA. In: XII CEEL- Conferência de estudos em engenharia elétrica, Uberlândia. XII CEEL- Conferência de estudos em engenharia elétrica, 2014.
- [4] Apostila de Qualidade da Energia Elétrica, versão 2015, Nunes, S. Ivan.
- [5] Oliveira Rezende, P.H Uma Proposta de Condicionador de Ar Split Visando a Análise de Pedidos de Ressarcimento por Danos Elétricos. Dissertação para obtenção do Título de mestre em Ciências. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [6] Moreira Maia, R. Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia. Dissertação para obtenção do Título de mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.