

AGUSTIN VALVERDE GRANJA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE EXPERIMENTAL DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA (GD) COM ENERGIA SOLAR: ESTUDO DE CASO DA
UNIVERSIDADE DE IBAGUÉ - COLÔMBIA**

Guaratinguetá - SP
2017

Agustín Valverde Granja

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE EXPERIMENTAL DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA (GD) COM ENERGIA SOLAR: ESTUDO DE CASO UNIVERSIDADE
DE IBAGUÉ - COLÔMBIA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Mecânica na Área Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Co-Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá - SP
2017

G759i Granja, Agustín Valverde
Implementação de uma rede experimental de geração distribuída (GD)
com energia solar: estudo de caso da Universidade de Ibagué-Colombia /
Agustín Valverde Granja – Guaratinguetá, 2017
169 f. : il.
Bibliografia: f. 149-152

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

1. Energia solar. 2. Energia – consumo. 3. Desenvolvimento
energético. I. Título

CDU 620.91(043)

AGUSTIN VALVERDE GRANJA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG


Prof. Dr. EDERALDO GODOY JÚNIOR
UNITAU


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

Junho de 2017

DADOS CURRICULARES

AGUSTIN VALVERDE GRANJA

NASCIMENTO	22.09.1964 – Candelaria / Colômbia
FILIAÇÃO	Agustín Valverde Aura Granja Gôngora
1990/1996	Graduação em Engenharia Mecânica Universidad Autonoma de Occidente, Colômbia
2004/2006	Mestrado em Eficiência Energética /Engenharia Mecânica Universidad de Cienfuegos, Cuba.
2014/2017	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Nível de Doutorado, Centro de Energias Renováveis de Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista (FEG-UNESP). Brasil.
1997/2003	Instrutor do Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA) SENA cede Popayan, Colômbia
2004/2016	Professor do Departamento Engenharia Agroindustrial Universidad do Tolima, Colômbia
2003/ até a data	Professor do Departamento Engenharia Mecânica Universidad de Ibaguè, Colômbia

À minha família amada

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos, aos meus pais, por me dar vida e estar presente nos momentos difíceis,

à minha amada esposa por sua paciência e compreensão durante esta fase da minha vida,

aos meus filhos Juan Jose, Jeison Julian e Jaine Andrea, por me permitir o uso de seu tempo para que eu pudesse me desenvolver intelectualmente e profissionalmente,

ao meu irmão Eliecer, por ter-me ajudado sempre nas horas que precisei,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza* pela dedicação, orientação e auxílio que jamais deixou de me incentivar,

aos professores das disciplinas de minha graduação e pós-graduação, que com sua motivação incansável contribuiu para a realização desta importante fase da minha vida,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Eu não concordo com o que dizes, mas defenderei com minha vida o seu direito de expressá-la.”

Voltaire

RESUMO

Esta Tese de Doutorado apresentou o estudo dos problemas de tensão originados no ponto comum de conexão de uma rede experimental para fornecer até 1.000 kWh/mês de energia solar com a rede de baixa tensão da Universidade de Ibagué, na Colômbia. Inicialmente foi feita uma introdução, onde destacou-se a importância da geração distribuída, os problemas gerados e os objetivos propostos. Em seguida, foi realizado o estudo da qualidade da energia na rede de baixa tensão, conforme as normas NTC 5001. Foi dimensionada, montada e colocada em operação uma rede experimental, utilizando a metodologia proposta nesta Tese, composta de 30 painéis solares de 260 W marca IBC solar, um inversor marca Fronius de 7,6 kW e um contador bidirecional ligados diretamente à rede através com fio de seção transversal de 6,0 mm². A energia máxima produzida pela rede experimental foi de 850 kWh/mês, equivalente a 72,65% do total da capacidade instalada. Os painéis solares apresentaram uma eficiência média de 15,7%, a eficiência do inversor foi obtida na faixa de 75 a 94% e o desempenho global, P_R , entre 0,83 e 1,30. Depois de avaliar a rede experimental seguiu-se com a análise da qualidade da energia no ponto comum de ligação registrando, em relação às perturbações de longa duração, um aumento de 2%; o desequilíbrio da tensão diminuiu 3,5%, as harmônicas de tensão aumentaram 7% na linha U_1 , 0,8% na linha U_2 e 3% na linha U_3 . Em relação à corrente harmônica foi evidenciado um incremento de 22% na linha U_1 . Nos valores das cintilações de curto e longo prazo. Para os picos e interrupções de longa duração não foram encontrados diferenças significativas. Nas perturbações rápidas a potência ativa e reativa total no período do recesso aumentaram 58% e 42% respectivamente. A análise termográfica permitiu estabelecer um aumento da temperatura no ponto comum de ligação à rede de 7,5%. A temperatura superficial do painel foi calculada a partir do modelo matemático proposto neste trabalho para a cidade de Ibagué. O modelo foi resultado de uma análise estatística com o software Minitab e utilizou os dados da variação da radiação solar e da temperatura ambiente. Quando a temperatura do painel foi maior que a temperatura ambiente, a porcentagem de erro do modelo foi de 14,09%. O análise econômica permitiu estabelecer os custos de investimento por kWp instalado na rede experimental com o valor de 2100 USD/kWp. O valor presente líquido (VPL) começou a apresentar valores positivos a partir de 6,3 anos e a taxa interna de retorno (TIR) calculada para este projeto foi de 17,8%. Espera-se que as experiências no projeto possam servir de

referência na aplicação da lei 1715 do governo Colombiano para o aproveitamento da energia solar.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar. Geração de energia. Rede experimental. Qualidade da energia. Baixa tensão.

ABSTRACT

This doctoral thesis presented the study of voltage problems originating from the common point of connection of an experimental network to provide up to 1,000 kWh / month of solar energy with the low voltage network of the University of Ibagué in Colombia. Initially an introduction was made, highlighting the importance of distributed generation, the problems generated and the proposed objectives. Next, the study of the quality of the energy in the low voltage network was carried out, according to the norms NTC 5001. An experimental network was dimensioned, assembled and put into operation using the methodology proposed in this thesis, composed of 30 solar panels of 260 W brand IBC solar, a Fronius brand inverter of 7.6 kW and a bidirectional counter connected directly to the network through thread of cross-section of 6.0 mm². The maximum energy produced by the experimental network was 850 kWh / month, equivalent to 72.65% of the total installed capacity. The solar panels had an average efficiency of 15.7%, the efficiency of the inverter was obtained in the range of 75 to 94% and the overall performance, P_R , between 0.83 and 1.30. After evaluating the experimental network, it was followed by the analysis of the quality of the energy at the common point of connection, in relation to long-term disturbances, an increase of 2%; the voltage unbalance decreased by 3.5%, voltage harmonics increased by 7% in line U1, 0.8% in line U2 and 3% in line U3. In relation to the harmonic current, an increase of 22% in line U1 was evidenced. In the values of short and long term scintillations. For peaks and long-term interruptions no significant differences were found. In the fast perturbations the total active and reactive power in the period of the recess increased 58% and 42% respectively. The thermal analysis allowed to establish an increase in temperature at the common point of connection to the network of 7.5%. The surface temperature of the panel was calculated from the mathematical model proposed in this work for the city of Ibagué. The model was the result of a statistical analysis with Minitab software and used the data of solar radiation variation and ambient temperature. When the panel temperature was higher than the ambient temperature, the model error percentage was 14.09%. The economic analysis allowed us to establish the investment costs per kWp installed in the experimental network with a value of 2100 USD / kWp. The net present value (NPV) began to show positive values from 6.3 years and the internal rate of return (TIR) calculated for this project was 17.8%. It is hoped that the experiences in the project can serve as reference in the application of law 1715 of the Colombian government for the exploitation of solar energy.

KEYWORDS: Solar energy. Power generation. Experimental solar system. Power quality.
Low-voltage network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento do consumo de energia ativa em kWh.....	33
Figura 2 - Comportamento do consumo de energia reativa em kVarh.....	33
Figura 3 - Comportamento do consumo de energia em kWh por mês.....	34
Figura 4 - Conexões do analisador de energia.....	38
Figura 5 - Variação de tensão linha U_1	39
Figura 6 - Variação de tensão linha U_2	39
Figura 7 - Variação de tensão linha U_3	40
Figura 8 - Resultados das medições de desequilíbrio de tensão circuito.....	42
Figura 9 - Severidade de cintilação de curta duração (PST) Linha U_1	44
Figura 10 - Severidade de cintilação de curta duração (PST) Linha U_2	44
Figura 11 - Severidade de cintilação de curta duração (PST) Linha U_3	45
Figura 12 - Severidade de cintilação de longa duração (PLT) Linha U_1	45
Figura 13 - Severidade da cintilação de longa duração (PLT) Linha U_2	46
Figura 14 - Severidade da cintilação de longa duração (PLT) Linha U_3	46
Figura 15 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U_1	49
Figura 16 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U_2	50
Figura 17 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U_3	50
Figura 18 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDD _I) na linha U_1	54
Figura 19 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDD _I) na linha U_2	54
Figura 20 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDD _I) na linha U_3	55
Figura 21 - Valores de frequência registrada no circuito.....	61
Figura 22 - Valores médios da potência ativa na linha U_1	63
Figura 23 - Valores médios da potência ativa na linha U_2	63
Figura 24 - Valores médios da potência ativa na linha U_3	64
Figura 25 - Valores média da potência ativa total, Circuito 1.....	64
Figura 26 - Valores médios da potência reativa na linha U_1	65
Figura 27 - Valores médios da potência reativa na linha U_2	65
Figura 28 - Valores médios da potência reativa na linha U_3	65
Figura 29 - Valores média da potência reativa total, Circuito 1.....	66
Figura 30 - Valores do fator de potência total.....	66
Figura 31 - Localização da Universidade de Ibagué - Colômbia.....	68
Figura 32 - Radiação solar por hora pela estação da U.I entre 2010 e 2015.....	68
Figura 33 - Radiação solar por hora pela estação a Fazenda “La Ceiba” entre 2010 e 2015.....	69
Figura 34 - Condutor elétrico tipo de fio.....	80
Figura 35 - Condutor elétrico tipo de fio cabo.....	80
Figura 36 - Condutor elétrico tipo único condutor.....	81
Figura 37 - Condutor elétrico tipo multicondutor.....	81
Figura 38 - Partes de um condutor elétrico.....	82
Figura 39 - Conexões de rede experimentais para o ponto comum.....	89
Figura 40 - Plataforma metálica para a montagem dos painéis fotovoltaicos.....	91
Figura 41 - Painéis solares alinhados e dispostos em série.....	91
Figura 42 - Instalação do inversor na rede experimental.....	92
Figura 43 - Montagem do medidor de energia solar.....	92
Figura 44 - Monitoramento fornecidas no site da rede Experimental SolarWeb.....	93
Figura 45 - Representação do circuito elétrico da rede experimental.....	95
Figura 46 - Ponto de medição M1.....	95
Figura 47 - Ponto de medição M2.....	96

Figura 48 - Aparelhos de medição: (a) Termo-anemômetro digital tipo hélice, (b) alicate amperímetro, (c) medidor de energia solar, (d) pirômetro infravermelho, (e) câmeras de imagem térmica.	97
Figura 49- Energia produzida pela rede experimental em kWh/mês durante o período de estudo.	102
Figura 50 - Radiação solar incidente sobre a rede experimental.	103
Figura 51 - Comportamento da temperatura da superfície do painel solar.	105
Figura 52 - Superfície de resposta da temperatura superficial do painel em função da radiação solar e da temperatura ambiente.	106
Figura 53 - Comportamento da eficiência dos arranjos fotovoltaicos para cada mês de estudo.	106
Figura 54 - Eficiência do inversor em cada mês do estudo.	107
Figura 55 - Valores médios do Y_F , Y_R e P_R por mês para a rede experimental	108
Figura 56 - Comportamento da Energia ativa em kWh/dia.	109
Figura 57 - Comportamento da Energia reativa em kVARh por dia	109
Figura 58 - Variação da tensão da linha U_1	110
Figura 59 - Variação de tensão linha U_2	111
Figura 60 - Variação de tensão linha U_3	111
Figura 61 - Resultados das medições do desequilíbrio de tensão no circuito.	112
Figura 62 - Severidade da cintilação de curta duração (PST) na Linha U_1	113
Figura 63 - Severidade da cintilação de curta duração (PST) na Linha U_3	113
Figura 64 - Severidade da cintilação de curta duração (PST) na Linha U_3	113
Figura 65 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THD) na linha U_1	115
Figura 66 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U_2	115
Figura 67 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U_3	116
Figura 68 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDDI) na linha U_1	117
Figura 69 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDDI) na linha U_2	117
Figura 70 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDDI) na linha U_3	117
Figura 71 - Valores da frequência registrada no circuito.	119
Figura 72 - Valores médios da Energia ativa na linha U_1	120
Figura 73 - Valores médios da Energia ativa na linha U_2	120
Figura 74 - Valores médios da Energia ativa na linha U_3	121
Figura 75 - Valores médios da Energia ativa total em kW.	121
Figura 76 - Valores médios da Energia reativa na linha U_1	122
Figura 77 - Valores médios da Energia reativa na linha U_2	122
Figura 78 - Valores médios da Energia reativa na linha U_3	123
Figura 79 - Valores médios da Energia reativa total em KVAR.	123
Figura 80 - Valores do Fator de potência total.	124
Figura 81 - Análise termográfica antes da operacionalização do SFCR.	125
Figura 82 - Análise termográfica depois da operacionalização do SFCR.	125
Figura 83 - Informação sobre os painéis solares.	129
Figura 84 - Informação preenchida para a análise econômica no software RETScreen.	132
Figura 85 - Informação sobre a carga elétrica na avaliação econômica.	133
Figura 86 - Informação sobre o sistema fotovoltaico proposto.	134
Figura 87 - Análise dos custos do sistema fotovoltaico.	136
Figura 88 - Custos de investimento por kW instalado para diferentes fontes de energia.	137
Figura 89 - Redução de emissões de gases efeito estufa no software Retscreen.	138
Figura 90 - Parâmetros financeiro utilizados.	139
Figura 91 - Valor Presente Líquido (VPL) para várias tecnologias (taxa de desconto de 12%, 10 anos).	140

Figura 92 - Valor presente Líquido (VPL) do projeto obtido com o software Retscreen.	141
Figura 93 - Comparação da taxa Interna de Rentabilidade (TIR) para diferentes tecnologias.	142
Figura 94 - Análise de risco pelo software Retscreen.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das dependências por circuitos na Universidade de Ibagué	32
Tabela 2 - Classificação das perturbações da qualidade de energia elétrica por duração	35
Tabela 3 - Valores de referência de THD.....	49
Tabela 4 - Valores limite de distorção harmônica individual (Di) e demanda total (TDD).....	53
Tabela 5 - Valores de referência dos entalhes de tensão.	56
Tabela 6 - Valores de referência das Variações de frequência.....	61
Tabela 7 - HSP por mês na cidade de Ibagué entre 2010 e 2015	69
Tabela 8 - Dados de HSP na cidade de Ibagué durante o ano 2015.....	70
Tabela 9 - Ficha técnica de diferentes inversores.....	74
Tabela 10 - Informação técnica de diferentes painéis fotovoltaicos	76
Tabela 11 - Uso de condutores isolados com seções métricas	83
Tabela 12 - Uso de condutores isolados com seções AWG.	84
Tabela 13 - Parâmetros de desenho obtidos da rede experimental.....	85
Tabela 14 - Fator de correção por quantidade de condutores.....	85
Tabela 15 - Fator de correção por temperatura.....	85
Tabela 16 - Corrente admissível para condutores de cobre AWG.	86
Tabela 17 - Seções transversais dos cabos obtidos e utilizados na rede experimental.....	88
Tabela 18 - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica.....	90
Tabela 19 - Tempo e atividades de manutenção a serem executadas na rede experimentais...	94
Tabela 20 - Cronograma de monitoramento semanal.....	96
Tabela 21 - Características técnicas dos instrumentos de medição.	97
Tabela 22 - Produção de eletricidade da rede experimental em kWh/dia na primeira quinzena de cada mês durante o período de estudo.	98
Tabela 23 - Produção de eletricidade da rede experimental em kWh/dia na segunda quinzena de cada mês durante o período de estudo.	98
Tabela 24 - Produção total de eletricidade da rede experimental em kWh/dia durante o período de estudo a partir dos dados das Tabelas 22 e 23.....	99
Tabela 25 - Porcentagem de erro no cálculo da temperatura superficial dos painéis para vários modelos matemáticos.	104
Tabela 26 - Comparação da variação da tensão de estado estacionário	110
Tabela 27 - Comparação do desequilíbrio de tensão.....	112
Tabela 28 - Comparação da cintilação de curta duração (PST).	112
Tabela 29 - Comparação da cintilação de longa duração (PLT).	114
Tabela 30 - Comparação da distorção harmônica total de tensão (THD).	115
Tabela 31 - Comparação da distorção harmônica total (TDDI).	116
Tabela 32- Comparação dos Valores da frequência.	119
Tabela 33 - Comparação dos valores de Energia ativa em kW.	120
Tabela 34 - Comparação dos valores da Energia ativa total em kW.....	121
Tabela 35 - Comparação dos valores da Energia reativa em kVAr.....	122
Tabela 36 - Comparação dos valores da Energia reativa total em kVAr.	123
Tabela 37 - Comparação dos valores do Fator de potência.....	124
Tabela 38 - Resultados da análise termográfica antes e depois da operacionalização do SFCR.	125
Tabela 39 - Medições diretas da área utilizada pelos módulos fotovoltaicos da rede experimental.	126
Tabela 40 - Área disponível para a implementação do sistema fotovoltaico.	126
Tabela 41 - Informação sobre os painéis solares.....	130

Tabela 42 - Relação de custos unitários do sistema.	135
Tabela 43 - Comparação dos resultados com a CNT 5001	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CREG	Comissão Reguladora de Energia e Gás
FAO	Organização para a Alimentação e Agricultura
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
GD	Geradores Distribuídos
GFV	Geradores Fotovoltaicos
HSP	Horas de Sol Pleno
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IESO	Operador do Sistema Elétrico de Ontário
IL	Corrente de Carga
MSIEC	Comissão Internacional Eletrotécnica de Malasya
NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço
NTC	Norma Técnica Colombiana
PCC	Ponto de Conexão Comum
PLC	Controladores Lógicos Programáveis
PLT	Cintilação de Longa Duração
PST	Cintilação de Curta Duração
QEL	Qualidade da Energia Elétrica
REEEP	Associação de Energia Renovável e Eficiência Energética
RETIE	Regulamento Técnico de Instalações Elétricas
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SPPT	Seguidor do Ponto de Potência Máxima
TDD	Distorção Total de Demanda
THD	Distorção Harmônica Total
TIR	Taxa Interna de Retorno
UI	Universidade de Ibaguè
UPME	Unidade de Planejamento de Minas e Energia
UPS	Fonte de Alimentação Ininterrupta
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

U_1	linha 1
U_2	linha 2
U_3	linha 3
K	fator de desequilíbrio
U_{med}	tensão média das linhas
$P_{0,1}$	percentil a 0,1%
P_1	percentil a 1%
P_3	percentil a 3%
P_{10}	percentil a 10%
P_{50}	percentil a 50%
N	número de período
D_v	distorção harmônica individual da tensão
THD_v	distorção harmônica total de tensão
V_h	magnitude do componente harmônico individual
h	ordem de harmônica
V_1	magnitude do componente fundamental
D_i	distorção harmônica individual de corrente
TDD_i	distorção total de demanda de corrente
THD_i	distorção harmônica total de corrente
I_h	magnitude do componente harmônica individual
$PGFV$	potência do gerador fotovoltaico
E_i	produção média da eletricidade mensal
HSP_i	número de Horas de Sol Pleno da localidade
N_i	número de dias do mês
PR	fator de rendimento do sistema
FDI	fator de dimensionamento do inversor
P_i	potência do inversor
P_G	potência do gerador
N_s	número máximo de painéis em série
V_{max}^{INV}	tensão máxima do inversor
$V_{ca(Módulo\ a\ -10^{\circ}C)}$	tensão do circuito aberto do painel
$V_{ca(CTS)}$	tensão de circuito aberto do painel
$\Delta V_{(mV/^{\circ}C)}$	coeficiente de tensão diferencial
U	tensão de trabalho
N_{smin}	número mínimo de painéis que podem ser ligados em série
V_{min}^{INV}	tensão mínima do inversor
$V_{max(Módulo\ a\ 70^{\circ}C)}$	tensão máxima do painel
N_p	número máximo de linhas em paralelo
I_{FV}	corrente de entrada do inversor
I_{max}	corrente máxima dos painéis fotovoltaicos
I_{FV}	corrente de entrada o inversor
P_{max}^{INV}	potência máxima CC do inversor
V_{INV}	tensão máxima do inversor
I	intensidade da corrente de trabalho

N_m	número de painéis fotovoltaicos
A_m	área que ocupa um painel fotovoltaico
W	largura do painel fotovoltaico
L	comprimento do painel fotovoltaico
A_r	área requerida para a rede experimental
I_t	capacidade de transporte dos condutores
F_N	fator de correção por número de condutores
F_T	fator de correção por temperatura
ΔV	queda de tensão
R_C	resistência dos condutores
ρ	resistividade específica
$P_{out,CC}$	potência de saída em corrente contínua
$V_{out,CC}$	tensão de saída em corrente contínua
$I_{out,CC}$	corrente de saída em corrente contínua
$P_{in,system}$	potência de entrada ao sistema
G	radiação solar incidente
A	área superficial do painel
Y_F	produtividade final
E_{FV}	energia gerada
P_{nom}	potência nominal
Y_R	produtividade de referência
G_{inc}	irradiação solar que incide sobre o gerador
I_{STC}	irradiação em condições padrão
P_R	desempenho global do sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS.....	28
1.2	ESTRUTURA DO DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	29
2	ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA NA UNIVERSIDADE DE IBAGUE	32
2.1	QUALIDADES DA ENERGIA ELÉTRICA	34
2.2	PERTURBAÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	35
2.3	PERTURBAÇÕES DE LONGA DURAÇÃO OU PERMANENTE.....	36
2.3.1	Variações de tensão de estado estacionário	36
2.3.1.1	Sobretensão.....	37
2.3.1.2	Subtensão.....	37
2.3.1.3	Resultados das medições realizadas ao circuito 1.....	38
2.3.2	Desequilíbrio de tensão	40
2.3.3	Cintilações	42
2.3.4	Interrupções de longa duração	46
2.3.4.1	Harmônicos de tensão.....	47
2.3.4.2	Harmônicos de corrente.....	51
2.3.4.3	Entalhes de tensão (Notches).....	55
2.4	PERTURBAÇÕES LENTAS.....	56
2.4.1	Interrupções de curta duração	56
2.4.2	Afundamentos de tensão	57
2.4.3	Elevações de tensão	58
2.4.4	Variações de frequência	60
2.5	PERTURBAÇÕES RÁPIDAS.....	61
2.5.1	Sobretensões transitórias	61
2.5.2	Potência ativa, reativa e aparente	63
2.5.3	Fatores de potência	66
3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFCR)	67
3.1	DETERMINAÇÕES DAS HORAS DE SOL PLENO (HSP).....	67

3.2	DIMENSIONAMENTOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE.....	71
3.2.1	Painéis Fotovoltaicos.....	71
3.2.2	Inversores.....	72
3.2.3	Números máximo de painéis que podem ser conectados em série (Ns).....	74
3.2.4	Tensão de trabalho (U).....	76
3.2.5	Números mínimo de painéis que podem ser conectados em série.....	76
3.2.6	Números máximo de linhas ligadas em paralelo (NP).....	77
3.2.7	Intensidades de corrente de trabalho (I).....	78
3.2.8	Potências do sistema fotovoltaico (PFV).....	79
3.2.9	Áreas requerida e número de painéis necessário para a rede experimental fotovoltaica.....	79
3.3	CONDUTORES ELÉTRICOS.....	80
3.3.1	Partes dos condutores elétricos.....	80
3.3.2	Características técnicas e condições de uso dos condutores elétricos.....	82
3.3.3	Dimensionamentos dos condutores elétricos.....	82
3.3.3.1	Dimensionamento por Intensidade de corrente Elétrica.....	83
3.3.3.2	Dimensionamentos dos cabos para os painéis fotovoltaicos.....	84
3.3.3.3	Dimensionamentos dos cabos elétricos após o inversor.....	86
3.3.3.4	Dimensionamentos por tensão elétrica.....	86
3.3.3.5	Dimensionamentos do circuito por tensão elétrica em corrente contínua.....	87
3.3.3.6	Dimensionamentos do circuito por tensão elétrica alternada.....	88
4	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA REDE EXPERIMENTAL.....	90
4.1	DESCRIÇÃO GERAL.....	90
4.2	OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	93
4.3	MANUTENÇÃO DO SISTEMA.....	94
5	ANÁLISE DA REDE EXPERIMENTAL.....	95
5.1	METODOLOGIA.....	95
5.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	97
5.3	RESULTADOS.....	97
5.3.1	Produção de potência elétrica.....	97
5.3.2	Medição de variáveis e determinação de indicadores.....	99
5.3.2.1	Produtividade final (YF).....	100

5.3.2.2	Produtividade de referência (YR).....	100
5.3.2.3	Desempenho Global do Sistema (PR).....	101
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	101
5.4.1	Potência instalada.....	101
5.4.2	Variáveis.....	102
5.4.2.1	Radiação solar.....	102
5.4.2.2	Temperatura do painel fotovoltaico.....	103
5.4.3	Cálculo de eficiências e rendimentos.....	106
5.4.3.1	Eficiência dos arranjos fotovoltaicos.....	106
5.4.3.2	Eficiência do inversor.....	107
5.4.3.3	Produtividade final, Produtividade de referência e Rendimento Global.....	107
5.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA NO PONTO COMUM DE CONEXÃO À REDE.....	108
5.5.1	Perturbações de longa duração ou permanentes.....	110
5.5.1.1	Varição da tensão de estado estacionário.....	110
5.5.1.2	Desequilíbrio de tensão.....	111
5.5.1.3	Cintilações.....	113
5.5.1.4	Interrupções de longa duração.....	114
5.5.1.5	Harmônicos de tensão.....	114
5.5.1.6	Harmônicos de corrente.....	116
5.5.1.7	Entalhes de tensão.....	118
5.5.2	Perturbações lentas.....	118
5.5.2.1	Interrupções de curta duração.....	118
5.5.2.2	Afundamentos de tensão.....	118
5.5.2.3	Elevações de tensão.....	118
5.5.2.4	Variações de frequência.....	118
5.5.3	Perturbações Rápidas.....	119
5.5.3.1	Sobretensões transitórias.....	119
5.5.3.2	Potência ativa, reativa e aparente.....	119
5.5.4	Análise termográfica no ponto comum de conexão (PCC).....	124
6	AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO.....	126
6.1	CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	126

6.2	INCENTIVOS PARA O INVESTIMENTO EM PROJETOS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NA COLÔMBIA.....	127
6.3	COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	128
6.3.1	Venda de energia elétrica a partir de geradores distribuídos.....	128
6.4	PROPOSTA TÉCNICA.....	128
6.4.1	Geração com painéis solares.....	129
6.4.2	Conversão de energia.....	129
6.4.3	Comunicação.....	130
6.4.4	Estrutura de suporte.....	131
6.5	AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO.....	131
6.5.1	Informação requerida pelo software.....	132
6.5.1.1	Informação geral.....	132
6.5.1.2	Características da carga.....	133
6.5.1.3	Sistema de geração elétrica proposto.....	133
6.5.1.4	Custo do investimento.....	135
6.5.1.5	Análise de redução de emissões.....	137
6.5.1.6	Parâmetros financeiros.....	138
6.5.1.7	Valor Presente Líquido.....	139
6.5.1.8	Taxa Interna de Retorno.....	140
6.5.1.9	Análise de riscos.....	142
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	144
	REFERÊNCIAS.....	149
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	153

1 INTRODUÇÃO

De acordo com os temas abordados pela rede global de políticas de energia renovável REN21, 16% da geração de energia mundial vem da energia renovável, onde a geração fotovoltaica tem uma contribuição do 0,6%. Estudos realizados pela Agência Internacional de Energia, indicam que o consumo de energia poderia aumentar em mais de 50% entre 2009 e 2030, isto é, de $1,33 \times 10^{23}$ kWh para $2,03 \times 10^{23}$ kWh. Portanto, a agência sugere que o uso de energia renovável deve se incrementar significativamente até 2050 para que possa atender mais da metade das necessidades energéticas do mundo, ao mesmo tempo em que contribui para redução da poluição.

A geração distribuída é importante dentro dos cenários e tendências futuras, poucos deles são de uso comercial embora tenham um grande mercado a nível mundial. Na atualidade, as políticas energéticas não evoluíram junto com o crescimento das micro redes, a qual é uma opção para adicionar, gerir e utilizar os recursos de energia distribuída, particularmente durante uma queda de energia. Com este tipo de rede é possível aumentar a confiabilidade, reduzir os custos de investimento relacionados a usinas de geração durante o horário de pico e tirar proveito da resposta sobre a demanda dos recursos e eles podem ajudar a mitigar os efeitos de uma crescente dependência de recursos não renováveis.

A maior parte dos recursos financeiros para investimentos públicos e privados é direcionada para a modernização da rede de energia elétrica convencional no mundo, sendo absorvida pela implantação de redes de serviços públicos inteligentes, com muito pouco financiamento para microrredes (CHRIS, 2010). Os recentes avanços realizados pelos investidores estão relacionados com a preparação do terreno para um mercado viável para microrredes. Isto envolve tecnologia para que nos painéis fotovoltaicos e as pequenas turbinas eólicas a corrente contínua (CC) seja convertida em alternada (AC), elevando o nível da tensão e mantendo a frequência de 60 Hz para obter sincronismo com a rede pública. Novos inversores permitem operar o sistema fotovoltaico quando a rede convencional fica inoperante, evitando-se assim os problemas de falha de fornecimento de energia elétrica.

Os engenheiros que trabalham nos serviços públicos historicamente se opõem ao conceito de micro redes com base na segurança e à falta de controle da rede de distribuição. Entretanto, o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos da IEEE desenvolveu por mais de cinco anos

um manual sobre micro redes. Este manual recebeu uma aprovação de noventa por cento na votação no final de 2009, um fato importante já que o manual apresenta os protocolos de segurança para a formação de microrredes assim como as diretrizes para potência reativa. Isto permite às microrredes vender serviços auxiliares, da mesma forma que os fornecedores para os mercados estabelecidos.

Os estudos experimentais sobre os problemas de tensões causados nos sistemas fotovoltaicos são necessárias, pois somente dados experimentais poderiam mostrar o comportamento real do sistema. Todos os problemas de tensão, sincronismo e valor de potência fornecido necessitam ser estudados exaustivamente antes dos sistemas fotovoltaicos tiverem uma representação com valores expressivos nas redes elétricas. De acordo com a Comissão Internacional Eletrotécnica da Malasya (MSIEC) a tolerância legal de tensão na rede de distribuição é de $\pm 10\%$, com referência a 230 V.

Em uma rede trifásica, o desequilíbrio de tensão ocorre quando a magnitude da tensão de cada fase ou o ângulo de fase entre duas tensões é diferente das condições nominais. No entanto, os princípios fundamentais de um sistema trifásico mostram que deve existir um pequeno nível de desequilíbrio de tensão quando uma condição de carga deve ser conservada. No entanto, uma condição é atingida só através da utilização de cargas monofásicas de tipo não linear, tais como uma mudança de alimentação. O desequilíbrio pode provocar o aumento desnecessário da temperatura nos enrolamentos do motor e prejudicar o seu desempenho, reduzindo a vida útil do motor de indução. A condição de desequilíbrio pode também afetar uma grande quantidade de fontes de energia renovável monofásico conectada em redes de distribuição (MOKHTARI et al., 2014).

Geralmente, as redes de média e alta tensão são aquelas que apresentam mais flutuações (DELESPOSTE; MELLO; SIMONETTI, 2011) devido ao uso de fornos a arco, equipamentos de solda, laminadoras e outros similares (DUGA; MCGRANAGHAN; SANTOSO, 2012). Por outro lado, as cintilações de curto e longo prazo não são comuns nas redes de baixa tensão, mas nos casos existentes a sua duração é com frequência muito curta, causada pela partida de grandes motores elétricos, raios-X, bombas e refrigeradores, as cintilações não são significativas, mas se a ocorrência da cintilação é relativamente alta os motores elétricos podem mudar os torques de partida, aumentando o consumo de energia, reduzindo a eficiência das máquinas e a vida útil dos motores.

As flutuações de tensão podem provocar variações na luminosidade das fontes de luz (DEOKAR; WAGHMARE, 2010). Além disso, uma tensão de alimentação instável provoca o funcionamento inadequado dos equipamentos eletrônicos, a ativação indesejada das unidades de fonte de alimentação ininterrupta (UPS) para mudar a energia da bateria e reduzir a eficiência operacional do mesmo (MARTÍNEZ; GUALDA, 2006). Para sistemas interligados, este tipo de geração implica uma mudança na visão. O usuário final pode fornecer energia para o sistema de baixa tensão que permitiria, entre outras coisas, reduzir as perdas de transmissão e distribuição, aumentar a folga do sistema e reduzir a dependência do sistema centralizado. É desejável para identificar as condições técnicas de interligação para estes novos geradores de modo a que os níveis de fiabilidade estabelecidos sejam mantidos.

O governo da Colômbia, através da lei 1715 de 2014, estabelece o marco e instrumentos legais para a promoção e exploração de fontes de energia não convencionais, principalmente aquelas de fontes renováveis, bem como para a promoção do investimento, pesquisa e desenvolvimento de tecnologias limpas para a produção de energia. A legislação também visa estabelecer linhas de atuação para o cumprimento de compromissos assumidos pela Colômbia na área de energia renovável, gestão eficiente da energia e redução das emissões de gases de efeito estufa; isto por meio da aprovação do Estatuto da Agencia Internacional de Energia Renováveis (ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL COMMISSION, 1994).

A lei estabelece que na autogeração em pequena escala precisa-se do uso de medidores bidirecionais de baixo custo para o registro do consumo ou da energia entregue em relação à rede. Outros temas tratados são os procedimentos de conexão simples e a entrega do excedente para tornar possível o uso da autogeração no setor residencial.

A energia gerada por geradores distribuídos serão remunerados considerando os benefícios, para o sistema de distribuição onde ele se conecta, entre os quais podem mencionar-se as perdas evitadas, a vida útil dos ativos de distribuição, o fornecimento de potência reativa, entre outros.

Atualmente, a Universidade de Ibagué tem um consumo de energia entre 55 e 60 MWh/mês. Portanto, a instalação da rede experimental de 12.000 kWh/ano representa uma economia de 12 milhões de pesos colombianos por ano (equivalente a R\$ 13.200,00), com a possibilidade de venda do excedente gerado nos fins de semana e durante os períodos de férias. A aplicação da lei 1715 de 2014 é de especial relevância, porém oferece mais dúvidas do que

respostas. A questão é que, embora existam avanços na implantação de geradores distribuídos em todo o mundo, ainda têm problemas nos pontos de ligação à rede e na forma como os grandes geradores realizam a distribuição dos recursos.

A legislação colombiana é baseada nos geradores de mais de 1 MW que podem garantir as condições propostas na Norma Técnica Colombiana NTC 5001 de 2005 e nas resoluções 024, 032 e 065 de 2012 emitidas pela Comissão de Energia e Gás da Colômbia (CREG).

Entretanto, quando se aborda o tema dos geradores distribuídos surgem os seguintes questionamentos:

- Quais são a capacidade e qualidade da energia no ponto de ligação à rede?
- Quanta energia pode se gerar por m^2 no ano para o caso da Universidade de Ibagué usando a energia solar?
- Como resolver os problemas de desequilíbrio de tensão, intermitência, faltas de curto e longo prazo e flutuações na rede ao conectar um sistema de geração distribuída (GD)?
- Quais são os problemas que introduzem na rede elétrica com a conexão ao sistema de GD de um motor de indução, uma geladeira, lâmpadas, tornos, fresadoras, entre outros?
- Como funciona o sistema GD dependendo da capacidade disponível na rede e qualidade de energia nele?
- Quais são os requerimentos mínimos para proteger o sistema GD contra problemas de sobrecarga e saídas não planejadas na rede?
- Qual deve ser o preço por kWh gerado em sistemas GD?

Portanto, busca-se a realização deste projeto de forma estruturada, fazendo uso de ferramentas científicas e de engenharia através de um processo de pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é instalar uma rede experimental de 1000 kWh/mês utilizando energia solar como forma de geração distribuída na Universidade de Ibagué, na Colômbia. Dentro dos fatores analisados está a caracterização do sistema de baixa tensão da rede de alimentação considerando a qualidade da energia na rede. No dimensionamento e instalação da rede experimental de energia solar inclui-se o número de painéis, o inversor e sistema do controle, previa caracterização da produção de energia fotovoltaica (radiação solar, velocidade

média do vento, tensão, corrente, corrente de curto circuito, eficiência dos painéis solares, eficiência do inversor, eficiência do sistema fotovoltaico). O estudo da qualidade de tensão, no ponto de conexão comum, aborda aspectos como o desequilíbrio de tensão, intermitência, cintilação de curto e longo prazo, flutuações e harmônico. Assim, é possível estudar os impactos dos problemas que apresenta a rede de baixa tensão com este tipo de conexão. Por último, foi realizada uma análise econômica e ambiental usando o software Retscreen focada à implementação de sistemas solares fotovoltaicos na Universidade de Ibagué na Colômbia.

1.2 ESTRUTURA DO DESENVOLVIMENTO DA TESE

Esta tese está dividida em sete capítulos, no capítulo um realiza-se a introdução da tese. o segundo capítulo refere-se a estudo de qualidade de energia na Universidade de Ibagué-Colômbia. o terceiro capítulo trata do dimensionamento do sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. No capítulo quarto trata-se da operação e manutenção da rede experimental. no quinto capítulo realizam-se os análise da rede experimental. O capítulo sexto refere-se avaliação econômica do projeto. E por fim, o sétimo capítulo apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

A seguir são descritas as etapas a serem desenvolvidas para atingir o objetivo final da Tese de Doutorado. Segue-se a metodologia para geração distribuída e redes inteligentes, cuja validação è baseada em indicadores tais como a quantidade de energia em kWh gerada, a qualidade da energia, a eficiência dos painéis solares, entre outros.

Os dados coletados são analisados estatisticamente através de modelos tipo ANOVA de um ou mais fatores. O programa computacional utilizado foi o SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

Por outro lado, a coleta da informação de natureza quantitativa è obtida diretamente da rede experimental, através de medições de energia com equipamento especializado, trabalhos inéditos, bancos de dados da empresa de energia do estado, dissertações de teses de mestrado e doutorado, livros, revistas, dicionários e websites de relevância e relacionados com o tema. Assim, o projeto foi desenvolvido em cinco etapas:

I. Caracterização do sistema de baixa tensão da rede que fornece energia à Universidade de Ibagué, na Colômbia.

A caracterização foi realizada a partir de medições com analisadores de rede em baixa tensão e monitoramento constante. A fim de determinar a qualidade de energia e as flutuações na carga da rede, deve-se efetuar:

- A seleção e adaptação da rede de baixa tensão;
- A calibração e instalação de instrumentação na rede de baixa tensão;
- A caracterização da qualidade de energia na rede de baixa tensão.

II. Caracterização da produção de energia fotovoltaica.

A caracterização começa com o dimensionamento da rede fotovoltaica, sua respectiva instalação e conexão com a rede de baixa tensão. São realizadas as medições de radiação solar, velocidade do vento, temperatura da superfície do painel, temperatura ambiente, e a corrente de curto-circuito na saída dos painéis, na saída do inversor e na rede. Com os resultados foi determinada a eficiência do equipamento e do sistema, assim como as curvas de desempenho das variáveis em relação ao tempo. Portanto, se efetuam:

- O dimensionamento dos sistemas que compõem a rede experimental;
- A montagem e instalação da rede experimental;
- A caracterização da produção de energia fotovoltaica, segundo a radiação solar incidente, tensão, corrente, corrente de curto-circuito e velocidade do vento.
- A determinação da eficiência dos painéis solares, a eficiência do inversor e a eficiência do sistema;
- A obtenção das curvas características dos componentes.

III. Estudo da qualidade da tensão no ponto de ligação à rede e o impacto dos problemas em baixa e média tensão.

Com os valores determinados na etapa I em relação ao comportamento em termos de qualidade de energia, e uma vez instalada a rede experimental realizam-se as mesmas medições a fim de determinar as perturbações criadas sobre a rede principal. Finalmente, após a comparação, os aspectos determinantes são sugeridos para ser analisados no marco regulatório que trata os sistemas de proteção. Requerem-se das seguintes atividades:

- O estudo do desequilíbrio e interrupções da tensão no ponto de ligação à rede;
- O estudo da cintilação curto e longo prazo, no ponto de conexão à rede;
- O estudo das flutuações e os harmônicos no ponto de conexão com a rede;
- O estudo dos impactos do problema de tensão na rede.

IV. Realização da análise econômica e ambiental utilizando ferramentas computacionais.

Utilizando os dados e resultados das etapas prévias, junto com o software Reetscreen, são realizados os cálculos necessários para a implementação do sistema solar fotovoltaico na Universidade de Ibagué. Incluem-se os custos dos diferentes componentes do sistema, realiza-se um estudo econômico do projeto para estabelecer os custos de instalação e dimensionamento do sistema, suas vantagens econômicas, retornos de investimento e contribuições para reduzir os gases de efeito estufa.

V. Análise dos resultados

Nesta última etapa, os resultados obtidos são avaliados a fim de encontrar uma condição ótima de operação da rede experimental quando conectada à rede principal, conseguindo definir o equipamento necessário para controlar o modo intermitente do nível de tensão no ponto de ligação à rede.

2 ESTUDO DA QUALIDADE DA ENERGIA NA UNIVERSIDADE DE IBAGUÉ

A Universidade de Ibagué (UI), conta com seis circuitos elétricos, ligados a um contador principal, do qual se pode medir em linha via modem por médio de um software, a distribuição das dependências por circuitos é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição das dependências por circuitos na Universidade de Ibagué

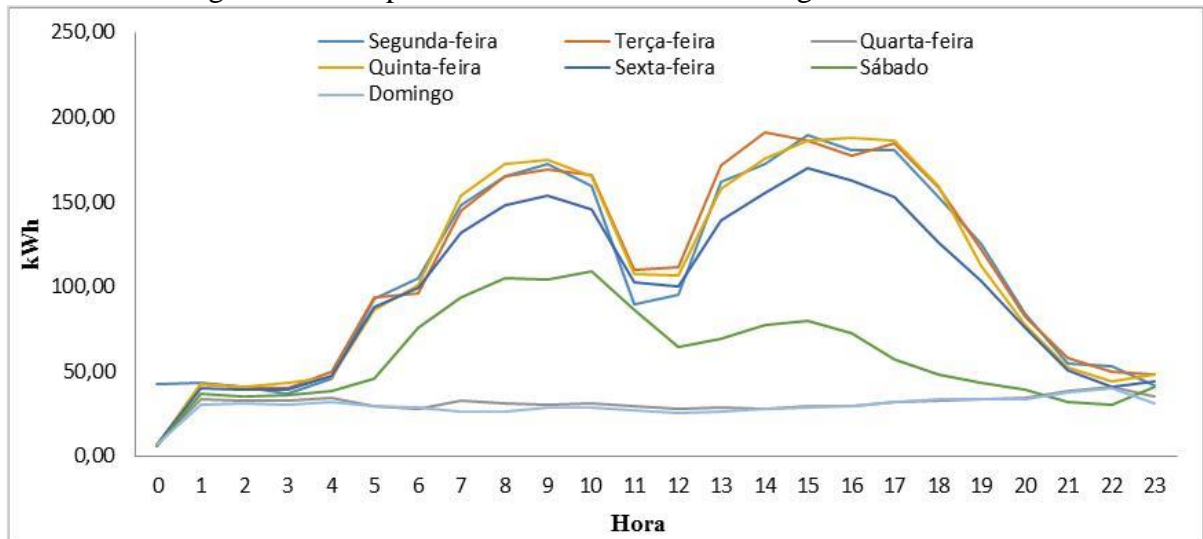
CIRCUITO	DEPENDÊNCIA	CAPACIDADE DO TRANSFORMADOR ELÉTRICO (kVA)
Circuito 1	Iluminação estacionamento dos professores Blocos 1 ao 6 Cafeteria Central Edifício de Humanidades – Piso 1	112,5
Circuito 2	Centro de educação Permanente Direção Administrativa. Edifício de ciências econômicas Biblioteca	45
Circuito 3	Bem-estar acadêmico Blocos 7, 8 e 9 Iluminação Exterior Edifício de engenharia	150
Circuito 4	Centro de Línguas	30
Circuito 5	Edifício de Direito	30
Circuito 6	Reitoria	75

Fonte: Produção do próprio autor

Os processos automatizados fazem uso de equipamentos eletrônicos, os quais são sensíveis as perturbações que se apresentam nas redes, ocasionando perdas importantes. Estima-se que a demanda por energia cresce com o incremento da população que tem mostrado a importância da implementação de ferramentas de gestão de energia. A economia de energia reduz os custos de produção, aumentando a produtividade, portanto, para uma otimizada utilização da energia elétrica é necessário sua medição e monitoração, as Figura 2.

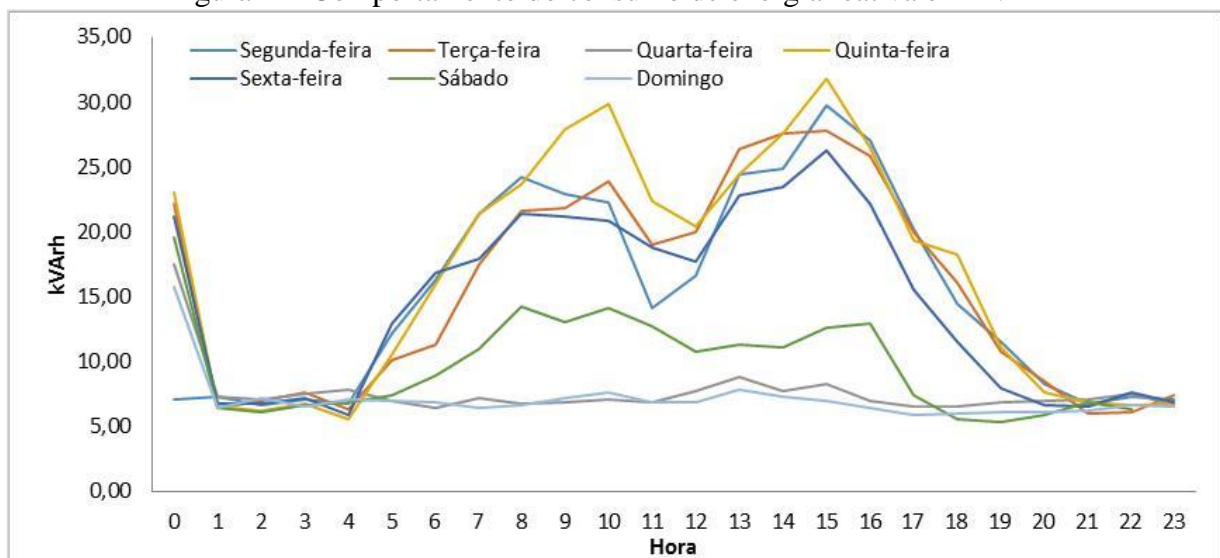
A Figura 1 mostra que a Universidade de Ibagué tem um consumo de energia ativa máximo de 190 kWh e mínimo 30 kWh, estes valores correspondem ao desenvolvimento das atividades acadêmicas, sendo máxima de segunda a sexta feira nos horários de classe e mínimo o fim de semana quando os estudantes não têm aulas. O mesmo comportamento apresentou no consumo de energia reativa com um máximo de 28 kVArh e mínimo de 5 kVArh, Figura 2.

Figura 1 - Comportamento do consumo de energia ativa em kWh.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 2 - Comportamento do consumo de energia reativa em kVArh



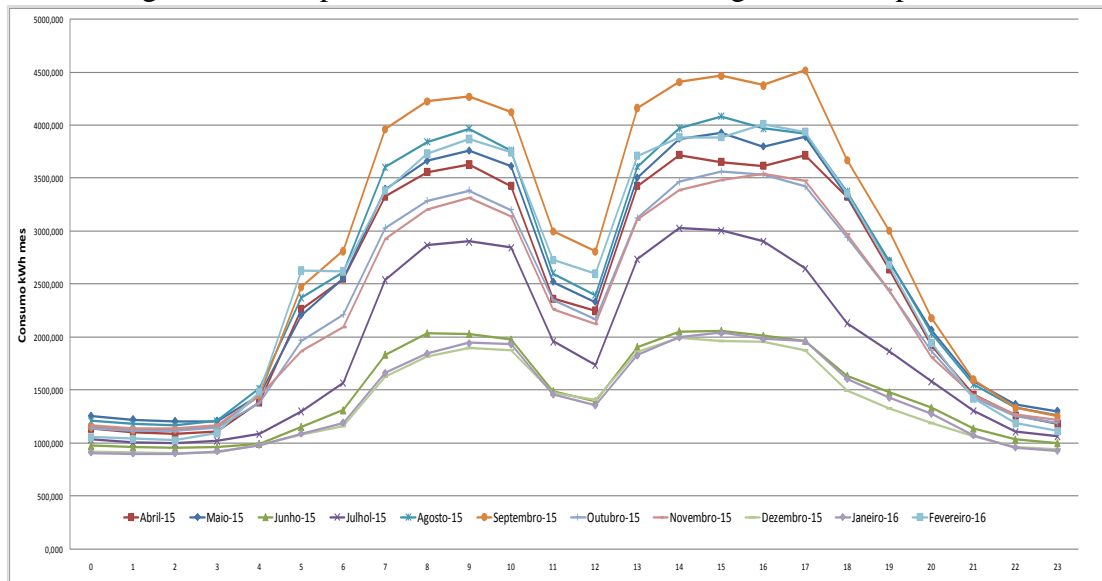
Fonte: Produção do próprio autor

O máximo consumo de energia mensal pela UI Figura 3, foi obtido as 17h durante o mês de Setembro de 2015, o qual foi de 4500 kWh/dia e o mínimo de 1000 kWh/dia durante o mês de Janeiro as 4h.

Nos sistemas elétricos de potência ocorre perturbações e distorções da onda de tensão e corrente elétrica, devido a implementação de cargas não lineares ou dispositivos eletrônicos de potência, afetando a qualidade da energia e instalações elétricas. Essa contaminação da energia

elétrica é devido as harmônicos de tensão e corrente, desequilíbrios de tensão, sobre tensões transitórias, variações de frequência e outras perturbações.

Figura 3 - Comportamento do consumo de energia em kWh por mês.



Fonte: Produção do próprio autor

Todas essas perturbações das correntes devem ser medida com instrumentos, equipamentos ou analisadores de redes que atendam os métodos e procedimentos de medição padrão, e os valores medidos devem atender aos padrões definidos pela NTC 5001.

Utiliza-se uma metodologia que permite executar medições de qualidade de energia, usando um analisador de rede elétrica marca Hioko, para realizar testes e analisar perturbações que afetam o circuito elétrico antes da implementação da rede experimental.

2.1 QUALIDADES DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica (QEL) tem como finalidade verificar as propriedades físicas dos sistemas elétricos de potência entre os quais a amplitude, a frequência, a forma de onda, corrente e tensão. Com relação à qualidade de energia, as normas mais importantes na Colômbia são: a compatibilidade eletromagnética (IEC 61000-4-7, 2002),

Guia de medições e controle de harmônico nos sistemas elétricos de potência (IEEE, 1994), qualidade de energia elétrica (NTC-5001, 2008), tensão e frequência nominal em sistemas de

energia elétrica em redes de serviço (NTC-1340, 1998), uma série de regulações da Comissão Reguladora de Energia e Gás (CREG) (070,1998; 096, 2000; 084, 2002 e 0024, 2005), finalmente, o Regulamento Técnico de Instalações Elétricas (RETIE).

2.2 PERTURBAÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

As ondas elétricas dos parâmetros básicos como tensão de alimentação e a corrente estão sujeita alterações na frequência, amplitude e forma, devido a perturbações eletromagnéticas geradas por cargas não lineares tais como: desequilíbrio de tensão, abaixamento, cintilação, distorção harmônica outros que são mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das perturbações da qualidade de energia elétrica por duração

PERTURBAÇÕES	TIPO
Longa duração ou permanente	Variações de tensão de estado estacionário Desequilíbrio de tensão Cintilação Interrupções de longa duração (Duração ≥ 1 min) Harmônicos de tensão Harmônicos de corrente Entalhes de tensão Variações de tensão de longa duração
Lentas	Interrupções de curta duração (duração < 1 min) Abaixamento de tensão (Sags) Elevações Tensão (Swell) Variações de frequência
Rápida	Sobretensões transitorias

Fonte: Produção do próprio autor

Esta avaliação envolve problemas na qualidade de energia existente e são as medições que determinam o grau de nossas soluções, a metodologia proposta segue os passos básicos apresentados por (DUGAN et al., 2012) o qual estabelece o seguinte:

- Identificação do problema.
- Caracterização do problema.
- Identificação de soluções.
- Avaliação de soluções.

Os tópicos abordados nesta metodologia têm a ver exclusivamente com a fase da caracterização do problema.

2.3 PERTURBAÇÕES DE LONGA DURAÇÃO OU PERMANENTE

2.3.1 Variações de tensão de estado estacionário

As variações de tensão em estado estacionário, são os desvios do valor de tensão em um intervalo de tempo superior a um minuto, muitas vezes se tornam numa interrupção permanente.

Causas

Em um sistema eletrônico, as variações de estado estacionário dependem das características do desenho do sistema, variações de grandes cargas elétricas e outras variações em que o sistema está sujeito.

Efeitos

- Saída de operação de motor.
- Alteração da velocidade nas máquinas de indução
- Computadores e controladores eletrônicos podem deixar de funcionar durante esta condição.
- A redução ou aumento da potência de saída do banco de capacitores.
- A luz visível de alguns dispositivos de iluminação pode ser reduzida ou aumentada.

Metodologia de avaliação

O período de medição deve ser de uma semana com um período de agregação de 10 minutos. 100% dos valores registados na semana deve ter uma tolerância de $\pm 10\%$ da tensão de alimentação declarada.

2.3.1.1 Sobretensão

É a tensão aumentada para um nível mais elevado do que 110% do valor nominal, para uma duração maior de um minuto, é o resultado da desconexão de grandes cargas ou à ligação de bancos de capacitores.

Efeitos

- Pode causar falhas de equipamento
- Os transformadores, cabos, e máquinas rotativas geralmente não mostram falhas imediatamente.
- Pode gerar operações indesejadas nos dispositivos de proteção
- A potência reativa de um banco de capacitores aumenta.
- Aumenta a luz visível gerada em dispositivos de iluminação

2.3.1.2 Subtensão

É a variação inferior a 90% do valor da tensão para uma duração maior do que um minuto, pode ser causado por ligações de novas cargas ou sobrecargas.

Na Colômbia, os limites para controlar variações de tensão são definidos pela Resolução CREG 024, 2005 entre + 10% e -10% da tensão nominal, e pode-se monitorar o registro da tensão com o tempo.

Efeitos

- Mal funcionamento do equipamento.
- O processo pára.
- O aumento da perda por aquecimento em motores de indução, devido ao aumento do consumo de corrente do motor.
- A mudança de velocidade na operação de motores de indução.
- Suspensão das operações de equipamentos eletrônicos, como computadores e controladores.
- A potência reativa de um banco de capacitores diminui.

- Em dispositivos de iluminação tem-se uma diminuição da luz visível gerado.

Metodologia de avaliação

A elevação da tensão pode ser caracterizada por dois parâmetros, a magnitude e duração. A duração é definida como o tempo medido desde o tempo em que o valor eficaz da tensão excede o limite, até quando retorna abaixo deste. A magnitude da elevação (tensão residual) é dada pelo valor máximo de tensão efetiva medida durante o levantamento em qualquer das linhas, e sua duração é dado pelo tempo de início e fim do evento. Para elevações tensões não existem valores de referência a nível normativo.

2.3.1.3 Resultados das medições realizadas ao circuito 1.

Na quarta-feira, 9 de dezembro de 2015 às 16h30min, a coleta de dados iniciou-se por 7 dias ao circuito 1, culminando na quarta-feira 16 de dezembro às 16h20min. As conexões do analisador de energia são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Conexões do analisador de energia

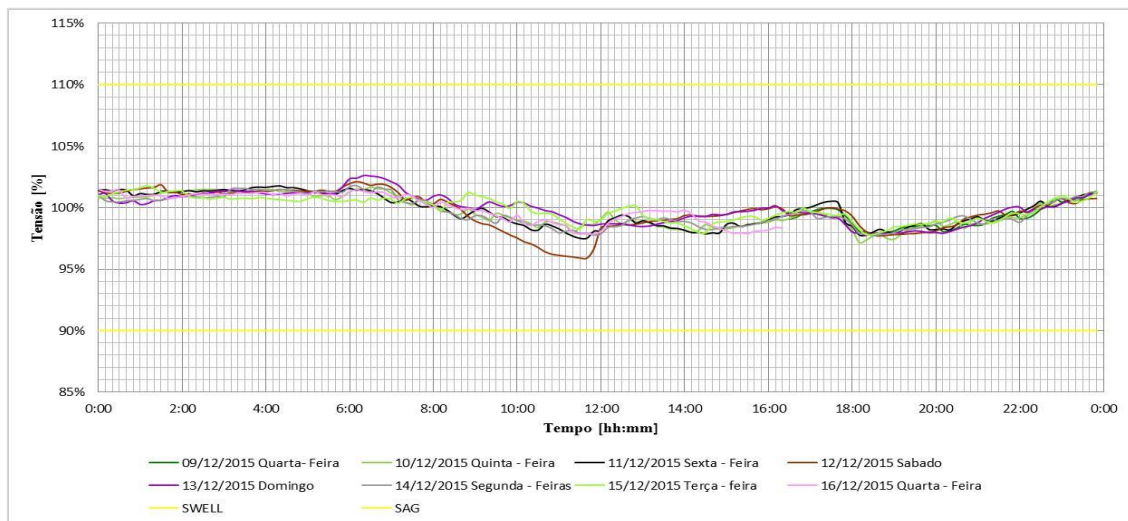


Fonte: Produção do próprio autor

Durante os sete dias de obtenções de dados observam-se o comportamento das tensões nas três linhas (U_1 , U_2 e U_3). De acordo com a norma devem ser analisados a cada 10 minutos, seu valor não deverá diminuir de 90%, ou ser maior 110% do valor de referência o qual corresponde à tensão declarada de 120 V, pela Universidade de Ibaguè na Colômbia.

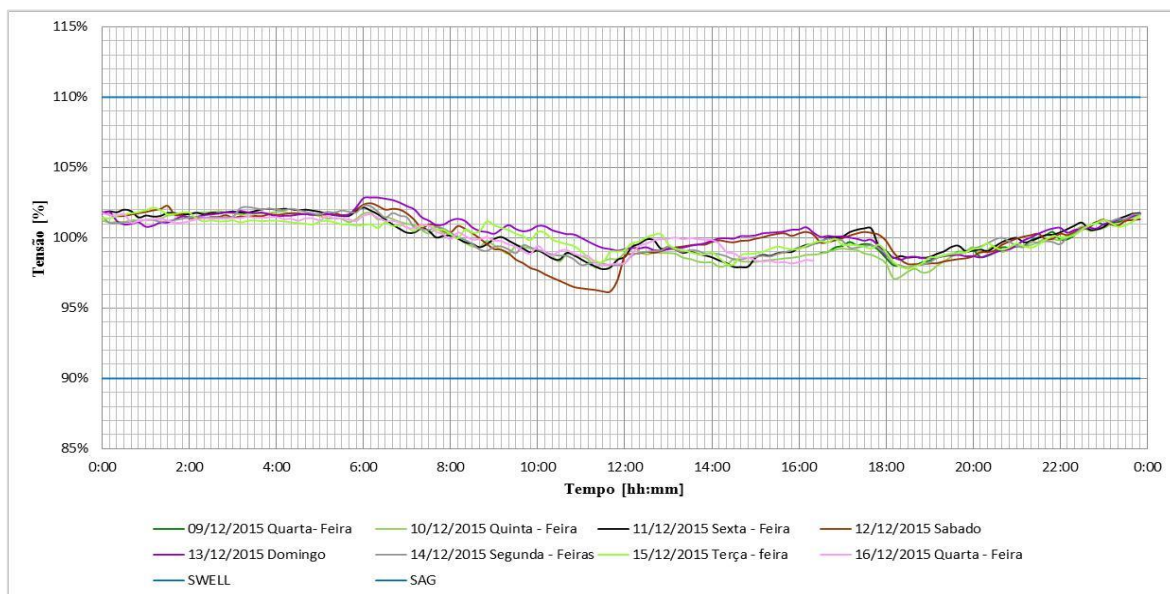
As variações de tensão nas linhas U_1 , U_2 e U_3 , Figuras 5, 6 e 7 estão próximo do 100%, sem exceder os limites superior e inferior. Foram registrados valores mínimos de 94,08, 95,90 e 96,16% no sábado às 11h40min nas linhas U_3 , U_1 e U_2 , respectivamente e valores máximos de variação na tensão de 100,58, 102,61 e 102,87% nas linhas U_3 , U_1 e U_2 e no domingo às 6h, não há sobre tensões e subtensões.

Figura 5 - Variação de tensão linha U_1 .

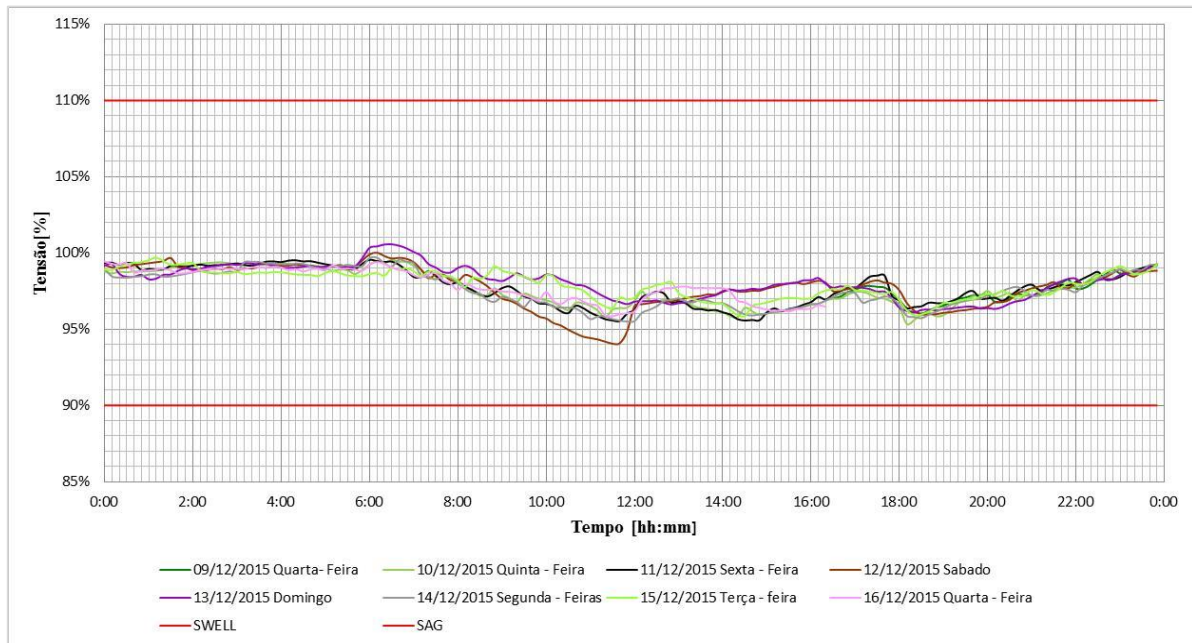


Fonte: Produção do próprio autor

Figura 6 - Variação de tensão linha U_2 .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 7 - Variação de tensão linha U₃.

Fonte: Produção do próprio autor

2.3.2 Desequilíbrio de tensão

Este índice caracteriza a magnitude e simetria do ângulo de fase das tensões nas três fases na operação de estado estacionário. O fator de desequilíbrio é definido como a relação entre os componentes de sequência negativa e positiva da tensão.

Causas

O desequilíbrio de tensão tem duas causas principais: a assimetria da impedância da linha e desequilíbrio de carga. As principais fontes de desequilíbrios de tensão são as cargas monofásicas em sistemas trifásicos.

Efeitos

- Carga do motor reduzida.
- Redução da vida do isolamento em motores elétricos.

Metodologia de avaliação

O período de medição deve ser de uma semana, para circuitos urbanos, com 99% dos valores de tensão de desequilíbrio, avaliadas em um período de 10 minutos, e deve estar dentro do intervalo de referência. Para circuitos rurais, 95% dos valores de tensão de desequilíbrio, avaliadas em um período de 10 minutos, devem estar dentro do intervalo de referência.

Valores de referência

Uma faixa de tensão < 69 kV, o valor de referência é 2%, para intervalos ≥ 69 kV, o valor de referência de tensão é 1,5%.

Utilizando a metodologia na norma NTC 5001 que apresenta a avaliação de um fator de desequilíbrio (K), por um período de 10 minutos, durante uma semana, avaliar esse fator pela Equação 1, da norma IEEE conhecido como razão de desequilíbrio, que é recomendado para trabalhar neste tipo de conexões de fase - neutro (NTC 5001).

Na categoria de circuitos de rua, 99% dos valores de desbalanceamento de tensão devem estar dentro dos valores de referência de 2% para as tensões abaixo de 69 kV.

$$K = \frac{\text{Max} (|U_1 - U_{med}| + |U_2 - U_{med}| + |U_3 - U_{med}|)}{U_{med}} \quad (1)$$

Onde:

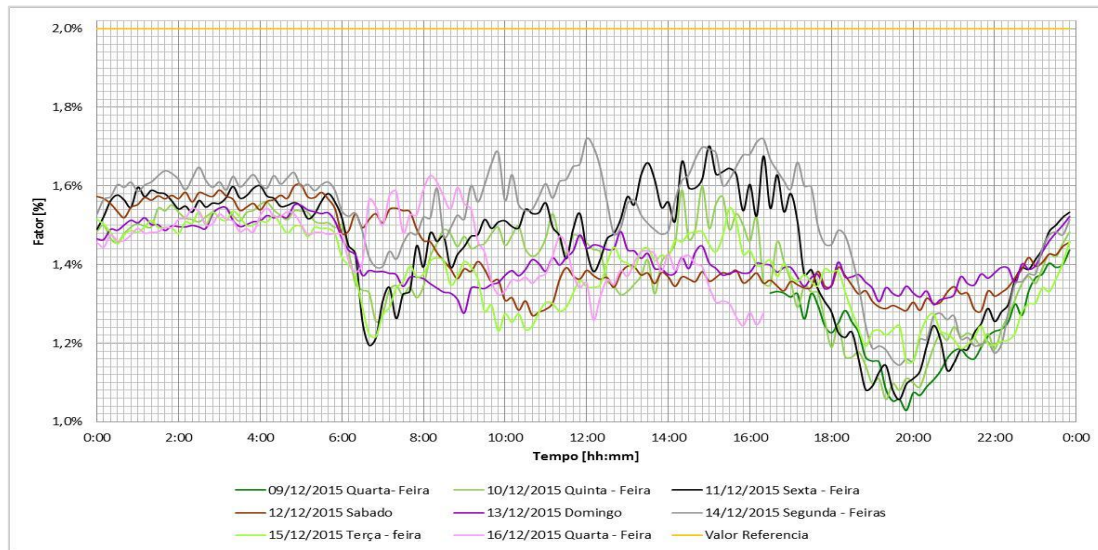
$U_{med} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}$; valor de tensão média das linhas, fase - neutro, (RMS).

U_1, U_2, U_3 ; os módulos das três tensões de cada uma das linhas, fase-neutro (RMS).

Resultados das medições de desequilíbrio de tensão

Na Figura 8, apresenta-se o desequilíbrio da tensão, onde 100% dos valores, estão abaixo dos valores estabelecidos pela norma (2,0%), com um máximo desequilíbrio de 1,72% registrado na segunda feira às 12h e mínimo de 1,05%, às 20h, na quarta feira.

Figura 8 - Resultados das medições de desequilíbrio de tensão circuito.



2.3.3 Cintilações

Refere-se ao efeito percebido visualmente como uma mudança na emissão da luz devido às flutuações da tensão da alimentação em baixa tensão. Este tipo de perturbação pode afetar diretamente aos seres humanos, segundo estudos médicos que demonstraram que o olho humano é muito sensível à luz de cintilação.

Causas

Dentro das causas podem se mencionar certas cargas industriais, tais como máquinas de soldas, grandes motores com fornos a arco de carga variável.

Efeitos

- Sensação de instabilidade visual;
- Irritabilidade e cansaço visual;
- Variação dos níveis de iluminação em bulbos incandescentes e bulbos de descargas;
- Redução da vida útil dos bulbos de descarga;
- Efeitos estroboscópicos.

Metodologia de avaliação

A gravidade dos efeitos da cintilação é entendida em termos de um índice chamado de PST para períodos de tempo curtos e outro chamado de PLT para períodos de tempo longos. Durante os períodos de medição de dez minutos, a severidade da cintilação de curta duração foi descrita com o índice PST; da mesma forma, a cintilação de longa duração com o índice PLT. O PLT é um valor médio do PST ao longo de um intervalo de tempo de duas horas (IEC 6100-4-7, 2002). Assim, depois de ter coletado registros de sinais da severidade da cintilação durante dez minutos, foram estabelecidos limiares correspondentes aos percentis, isto é, aqueles que excederam 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50% do tempo de observação. O PST é calculado com a equação 2.

$$PST = \sqrt{(0,0314 \times P_{0,1} + 0,0525 \times P_1 + 0,0657 \times P_3 + 0,28 \times P_{10} + 0,08 \times P_{50})} \quad (2)$$

Onde $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} são os percentis a 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50%, respectivamente. Os valores PST são usados para calcular o PLT por períodos mais longo de observação com a equação 3.

$$PLT = \sqrt[3]{\left[\frac{\sum_{i=1}^N PST_i^3}{N} \right]} \quad (3)$$

Onde N é o número de períodos para o cálculo do PLT dentro do tempo de observação; ou seja, são necessárias 12 medições de PST de 10 minutos para calcular o PLT por duas horas. O período de avaliação foi de uma semana.

Valores de referência

- De acordo com a norma IEC 61000-3-3:1995

O índice de severidade da cintilação de curta duração deve cumprir com $PST \leq 1,0$ p.u.

O índice de severidade da cintilação de longa duração deve cumprir com $PLT \leq 0.65$ p.u.

- De acordo com a norma EN 50160:1999 e NTC 5001

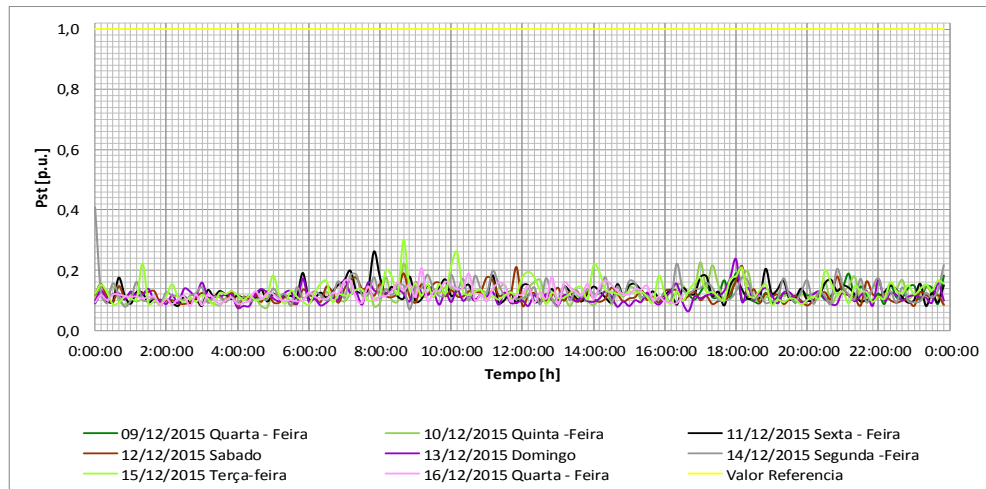
O índice de severidade da cintilação de curta duração não é considerado.

O índice de severidade da cintilação de longa duração deve cumprir com $PST \leq 1.0$ p.u, em 95% dos dados em uma semana.

Resultados obtidos nas medições de cintilação de curta duração (PST)

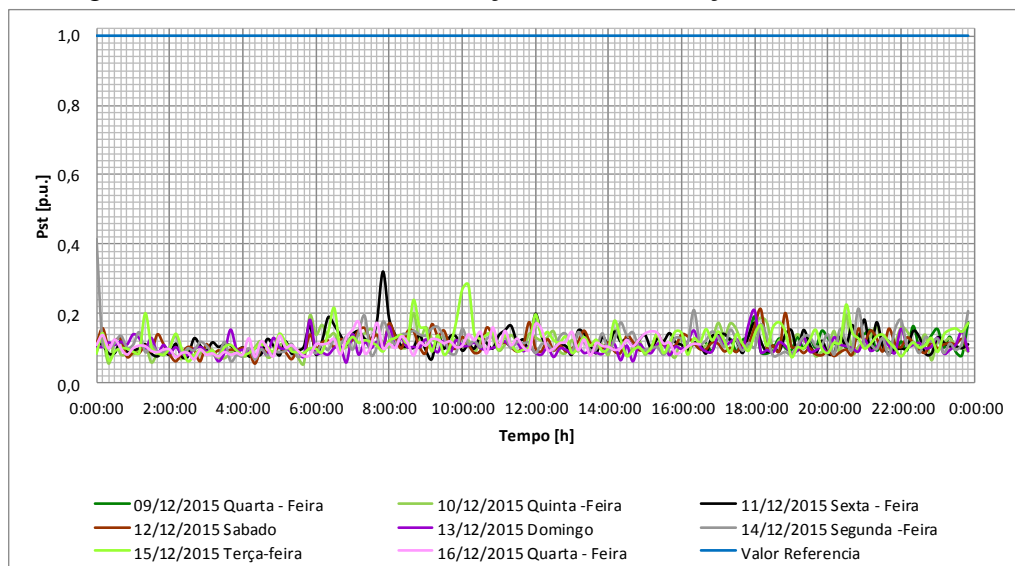
Nas Figuras 9, 10 e 11, apresentam os valores das cintilações de curta duração (PST) dentro do intervalo definido previamente, com uma distorção máxima de 0,4145 p.u na linha U_2 e mínima de 0,0566 p.u na linha U_3 . Todos os valores encontrados correspondem ao valor de referência ($\leq 1,0$ p.u).

Figura 9 - Severidade de cintilação de curta duração (PST) Linha U_1 .



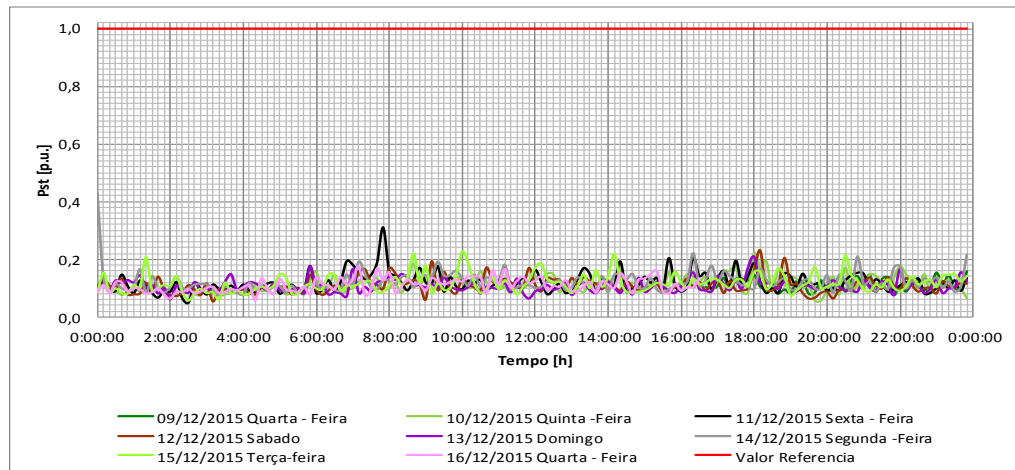
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 10 - Severidade de cintilação de curta duração (PST) Linha U_2 .



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 11 - Severidade de cintilação de curta duração (PST) Linha U₃.

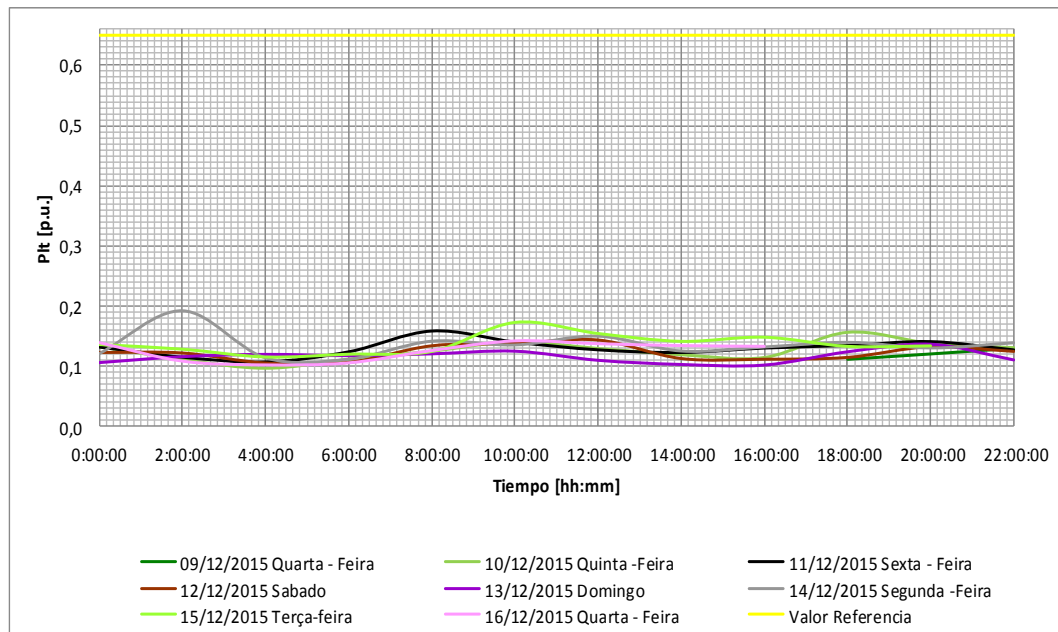


Fonte: Produção do próprio autor

Resultados obtidos nas medições de cintilação de longa duração (PLT)

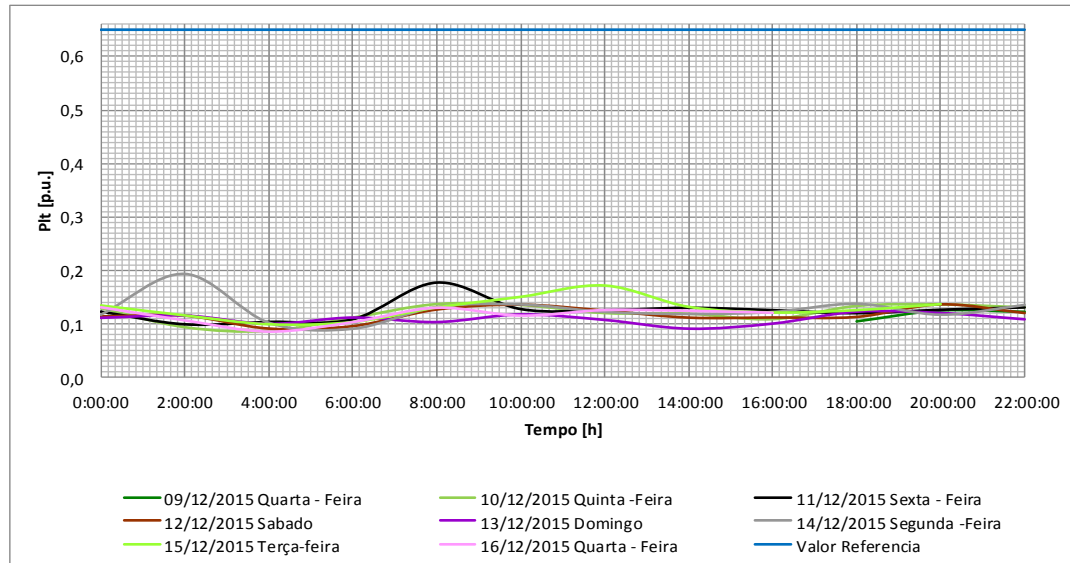
Nas Figuras 12, 13 e 14, pode-se observar que o valor máximo da cintilação de longa duração foi de 0,2002 p.u na linha U₃, e o valor mínimo de 0,0971 p.u na linha U₁. Todos os valores são menores ao valor de referência ($\leq 0,65$ p.u).

Figura 12 - Severidade de cintilação de longa duração (PLT) Linha U₁.



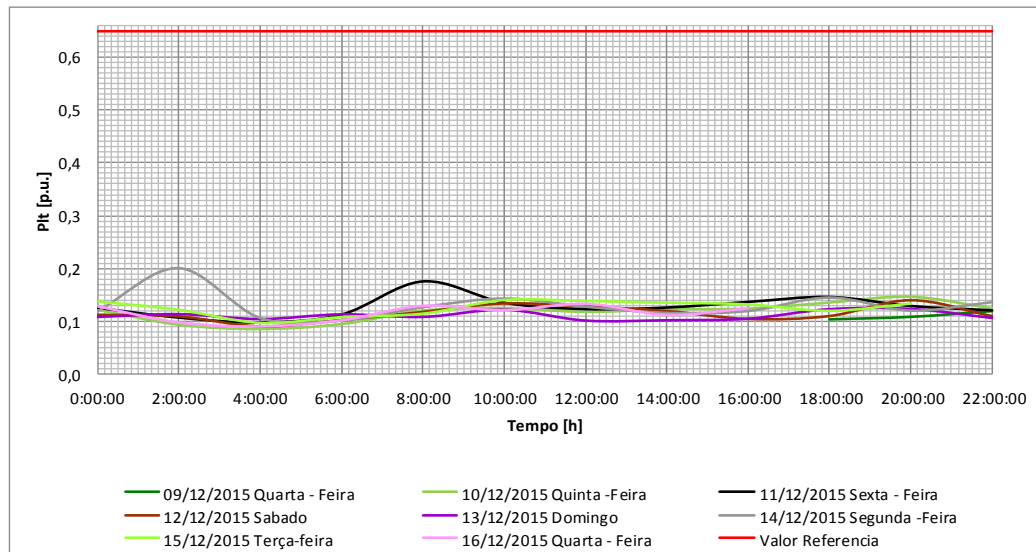
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 13 - Severidade da cintilação de longa duração (PLT) Linha U₂.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 14 - Severidade da cintilação de longa duração (PLT) Linha U₃.



Fonte: Produção do próprio autor

2.3.4 Interrupções de longa duração

As interrupções de longa duração são definidas quando o valor eficaz da tensão é menor que 10% da tensão declarada, isto em todas as fases e com uma duração maior ou igual um minuto pode ser programada ou acidental.

Causas

- Falha nas fontes do sistema de potência;
- Problemas nas transferências automáticas ou manuais;
- Abrir ou fechar dos interruptores de proteção;
- Falhas nos condutores elétricos;
- Disparo, por proteção, no sistema elétrico.

Efeitos

- Saída de operação dos equipamentos;
- Operação e energização inadequada dos motores de indução;
- Interrupção de processos e equipamentos;
- Saída de operação e reinício do sistema;
- Desligamento do sistema de iluminação;
- Queda de sistemas de telefonia.

Metodologia de avaliação

O período de avaliação foi de uma semana e contam com uma quantidade total de interrupções detectadas e adicionar seus tempos de duração.

Valores de referência

Os valores de referência estabelecidos por regulação em Colômbia, para baixa e média tensão, devem ser menores que 10 interrupções durante 3 minutos, ou de 50/ano.

Resultados obtidos nas medições de interrupções de longa duração

Durante as medições realizadas não se apresentaram interrupções de longa duração, como observado nas Figuras 5, 6 e 7.

2.3.4.1 Harmônicos de tensão

Refere-se às ondas senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (60 Hz). A presente definição abrange harmônicos de longa duração, estado estacionário, e não inclui fenômenos transitórios isolados.

Causas

Os harmônicos são causados por dispositivos cujas características de tensão e corrente são do tipo não linear; por exemplo, conversores eletrônicos de potência para motores elétricos de velocidade variável, retificadores e fornos a arco.

Efeitos

- Aumento das perdas por aquecimento em equipamentos elétricos;
- Registros incorretos em equipamentos de controle e monitoramento;
- Sobreaquecimento do equipamento de laminação, transformadores e condutores elétricos;
- Aumento dos níveis de ruído audível em equipamentos elétricos;
- Falha em isolamento de equipamentos elétricos;
- Dificuldade para iniciar os processos;
- Falha ou operação prematura em dispositivos de proteção;
- Condições de ressonância harmônica no sistema de potência elétrica do usuário, prejudicando o funcionamento e confiabilidade do sistema e os equipamentos;
- Falha de sincronização de disparo em equipamentos tais como variadores de velocidade;
- Aumento na faturação da energia por alteração do valor RMS da tensão e corrente através do medidor.

Metodologia de avaliação

O período de avaliação foi de uma semana, onde as medidas foram implementadas no ponto de conexão comum (PCC). Em condições de funcionamento normal, são calculados os percentis a 95% dos valores de distorção harmônica individual da tensão (D_V) e a distorção harmônica total de tensão (THD_V) para cada fase. Os percentis calculados devem ser inferiores ou iguais ao valor de referência. A distorção harmônica individual da tensão e a distorção harmônica total de tensão, foram calculadas com as Equações 4 e 5:

$$D_V = \frac{V_h}{V_l} \times 100\% \quad (4)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_l} \times 100\% \quad (5)$$

Onde:

V_h = Magnitude do componente harmônico individual (Volts rms).

h = Ordem de harmônica.

V_1 = Magnitude do componente fundamental (volts rms).

Valores de referência

A Tabela 3 apresenta os valores de referência considerados.

Tabela 3 - Valores de referência de THD.

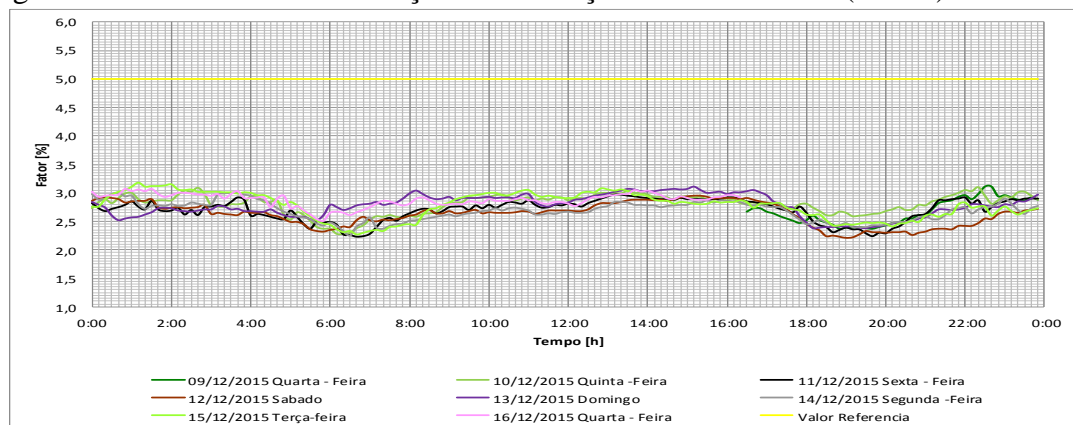
Faixa de tensão	Distorção harmônica individual (%)	Distorção harmônica total (%)
$1\text{kV} \leq V_n \leq 69\text{ kV}$	3,0	5,0
$69\text{ kV} \leq V_n \leq 161\text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n \geq 161\text{ kV}$	1,0	1,5

Fonte: Produção do próprio autor

Resultados obtidos nas medições

A distorção harmônica total foi analisada para cada uma das linhas, registrando medições a cada 10 minutos e durante sete dias. Segundo a norma, o valor padrão não deve exceder o 5% da faixa de tensão utilizada neste circuito. A Figura 15 apresenta os resultados das medições de distorção harmônica total de tensão (THDv) para a linha U_1 . Observa-se que os valores estão sempre por dentro do intervalo especificado, onde a distorção máxima foi de 3,18% registrada na terça-feira à 1h10min e a distorção mínima foi de 2,21% no sábado às 19h.

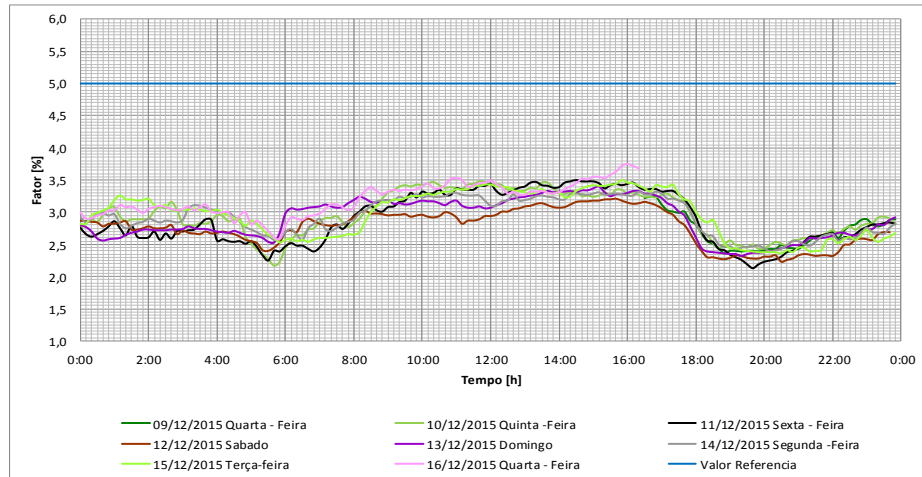
Figura 15 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U_1



Fonte: Produção do próprio autor

Os resultados das medições de distorção harmônica total de tensão (THDv) para a linha U₂ são apresentados na Figura 16. A distorção máxima foi de 3,72 % na quarta-feira às 16h e a distorção mínima de 2,13 % na sexta-feira às 19h40min. Todos os valores também estão por dentro do intervalo especificado pela Norma Técnica Colombiana NTC 5001.

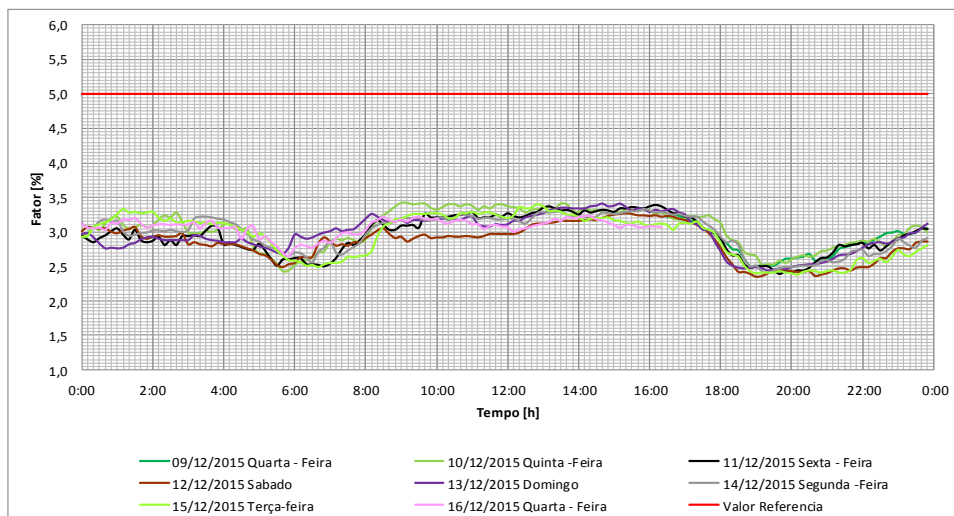
Figura 16 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U₂



Fonte: Produção do próprio autor.

No caso da linha U₃, os resultados podem ser observados na Figura 17, o valor máximo e mínimo da distorção harmônica total è de 3,42% na quinta-feira às 9h e de 2,40 % na terça-feira às 19h, respectivamente, em conformidade com as disposições da norma.

Figura 17 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THDv) na linha U₃.



Fonte: Produção do próprio autor.

2.3.4.2 Harmônicos de corrente

As cargas não lineares conectadas aos sistemas de fornecimento de energia produzem correntes harmônicas que se propagam através do sistema de potência, as quais podem causar distorção harmônica de tensão e afetar outros usuários.

Causas

- Comutação de alta frequência nas fontes de alimentação;
- Utilização de cargas controladas por tiristores;
- Grandes sistemas com fontes de alimentação interrupta UPS;
- Alta impedância das fontes de alimentação;
- Alta impedância na fiação elétrica;
- Utilização de cargas que comutam muito na rede, como equipamentos de soldagem, equipamentos de informática e fontes de alimentação interrupta.

Efeitos

- Sobreaquecimento e danos aos transformadores em redes de baixa carga, motores, geradores e reatores eletrônicos;
- Correntes excessivas em neutro;
- Proteções de operação sem causa aparente;
- Ruído audível excessivo em centros de distribuição;
- Falha em equipamentos eletrônicos, especialmente com THD em alta tensão;
- Perda de dados nos dispositivos de memória;
- Falhas em fontes de alimentação interrupta (UPS) em operação de transferência;
- Aumento da perda de energia em equipamentos elétricos;
- Risco de incêndio e explosões por existência de ressonâncias elétricas no sistema.

Metodologia de avaliação

O período de avaliação foi de uma semana, a distorção harmônica individual de corrente (D_i) e a distorção total de demanda (TDD) foram calculadas com as Equações 6, 7 e 8.

$$D_i = \frac{I_h}{I_l} \times 100\% \quad (6)$$

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_l} \times 100\% \quad (7)$$

$$TDD_I = THDi \times \frac{I_l}{I_L} \quad (8)$$

Onde:

THDi = Distorção harmônica total de corrente;

I_h = Magnitude do componente harmônica individual;

h = Ordem da harmônica;

I_l = Magnitude do componente fundamental;

I_L = Corrente de carga de demanda máxima no PCC;

Recomenda-se que a corrente de carga (I_L) seja calculada como o valor máximo da corrente eficaz de todas as fases, adicionados em intervalos de 10 minutos e durante um período de uma semana de avaliação.

Valores de referência

Os valores de referência são apresentados na Tabela 4.

Resultados obtidos nas medições

Os harmônicos pares não podem exceder o 25% dos limites previstos para os harmônicos ímpares. Os harmônicos com a distorção total de demanda (TDD) foram analisados para efetuar o cálculo seguindo as Normas Técnicas Colombianas NTC 5001 e NTC 819. Neste caso, o valor da corrente de carga de demanda de pico (I_L) foi de 80,88 A. A corrente de curto circuito (I_{sc}) foi calculada utilizando uma potência de transformador de 75 kVA e um fator de tensão de curto-circuito (U_{cc}) de 3,5%, estabelecido na norma ISO 819 para essa potência. Com uma tensão de 120 V em cada linha, a corrente de curto-circuito foi calculada pela Equação 9:

$$I_{sc} = \frac{S}{\sqrt{3}[(U_n \cdot U_z) + U_n]} \quad (9)$$

$$I_{sc} = \frac{75000}{\sqrt{3}[(120 \cdot 0,035) + 120]} = 348,64 \text{ A}$$

Adicionalmente, calculam-se a relação I_{sc}/I_L para conhecer o limite correspondente na norma NTC 5001:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{348,64}{80,88} = 4,31$$

Tabela 4 - Valores limite de distorção harmônica individual (Di) e demanda total (TDD)

Limites de distorção de corrente para sistema de distribuição 120V < Vn ≤ 69 kV						
Relação I_{sc}/I_L	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
< 20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20 < 50	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
50 < 100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100 < 1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
1000 <	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00
Limites de distorção de corrente para sistema de subtransmissão 69 kV < Vn ≤ 161 kV						
< 20	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20 < 50	3,00	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
50 < 100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100 < 1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
1000 <	7,50	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00
Limites de distorção de corrente para sistema de distribuição Vn < 161 kV geração distribuída e cogeração						
< 25	1,00	0,50	0,38	0,15	0,10	1,50
25 < 50	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
50 ≤	3,00	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

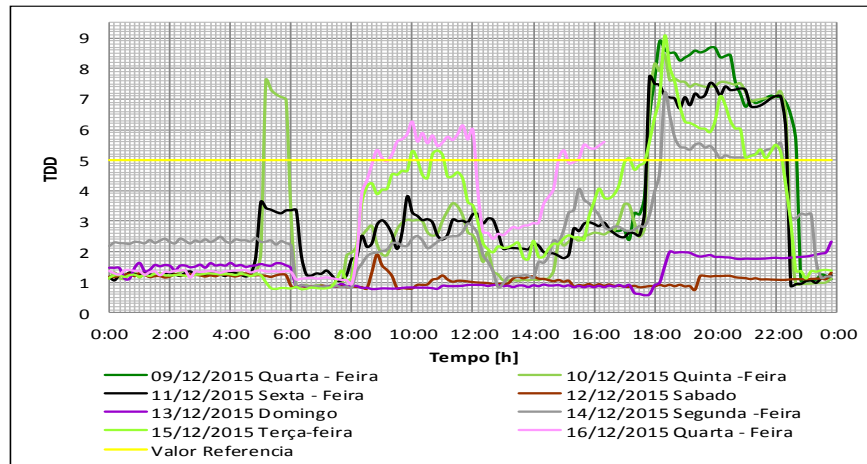
Fonte: Produção do próprio autor

Isc= mínima corrente de curto-circuito trifásica que tem disponível para fazer a avaliação no ponto de conexão comum (PCC). No caso de um utilizador monofásico deve-se utilizar a corrente de curto monofásica.

IL = corrente de demanda de pico no PCC.

Conforme a Norma Técnica Colombiana NTC 5001, para esta relação de corrente o limite máximo da distorção total da demanda é igual a cinco. Na linha U₁, a distorção máxima registrada na terça-feira às 18h20min de T_{DD} foi 9,06 e a distorção mínima de 0,61 no domingo às 17h50min. Neste caso, estes valores excedem os limites da norma NTC 5001 durante o 50% do tempo de trabalho Figura 18.

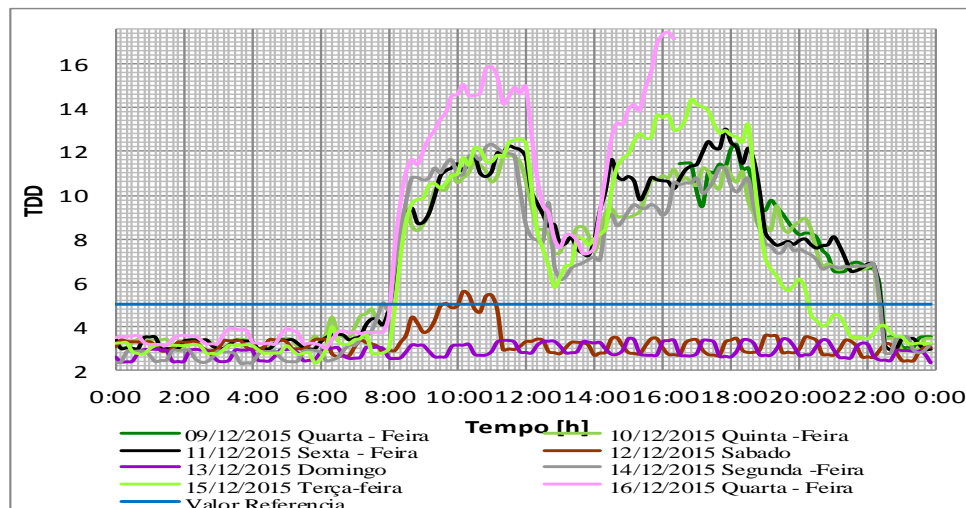
Figura 18 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDD_I) na linha U_1 .



Fonte: Produção do próprio autor

Para a linha 2, a distorção harmônica total de corrente (TDD_I) máxima foi de 17,47, medida na quarta-feira às 16h10min. A distorção mínima foi de 2,29 e corresponde à segunda-feira às 15h40min (Figura 19). Os valores excedem os limites estabelecidos pela norma NTC 5001 durante o 59% do tempo de trabalho.

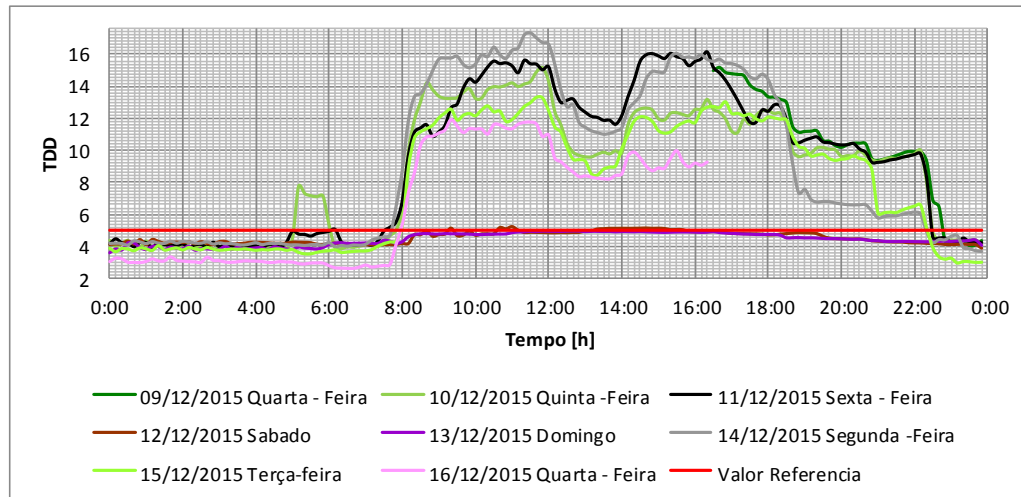
Figura 19 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDD_I) na linha U_2 .



Fonte: Produção do próprio autor.

Na linha U_3 a distorção máxima também excede os limites da norma NTC 5001 Figuras 20 durante o 59% do tempo de trabalho. Neste caso, o valor máximo foi de 17,34, registrado na segunda-feira às 11h30min; a distorção mínima foi de 2,61 e na quarta-feira às 6h40min.

Figura 20 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDD_1) na linha U₃.



Fonte: Produção do próprio autor

2.3.4.3 Entalhes de tensão (Notches)

São uma perturbação eletromagnética periódica que afeta a forma de onda da tensão, reduzindo seu valor instantâneo durante os intervalos que geralmente não excedem 0,5 ciclos.

Causas

São fenômenos gerados por equipamentos eletrônicos cujo funcionamento normal envolve comutação de correntes. Assim, a causa principal é resultante dos conversores trifásicos quando produzem corrente CC, que são comutadas de uma fase para outra, gerando um curto-circuito momentâneo entre as duas fases, que torna o valor instantâneo da tensão próximo do zero.

Efeitos

Funcionamento inadequado dos dispositivos associados ao controle de equipamentos.

Metodologia de avaliação

A distorção harmônica total do sinal (THD_{nvi}) foi calculada a partir da equação 10.

$$THD_{nvi} = 0.074 \sqrt{\frac{A_v}{\rho}} \% \quad (10)$$

Onde:

A_v = Área do Entalhe medida em V- μ s, (Volts – microssegundos).

ρ = Relação da indutância total em relação ao sistema.

Valores de referência

Os valores de referência são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Valores de referência dos entalhes de tensão.

	Limites de distorção		
	Aplicações Especiais	Sistema Geral	Sistema Dedicado
Profundidade Notche	10 %	20%	50%
THD (Tensão)	3 %	5%	10%
Área Notche A_v , em V- μ s	16400	22800	36500

Nota: O valor de A_v para sistemas diferentes de 480 V deve ser multiplicado por $V / 480$.

Fonte: Produção do próprio autor.

Resultados obtidos nas medições

Conforme os dados apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 não foram encontrados entalhes de tensão nos resultados.

2.4 PERTURBAÇÕES LENTAS

2.4.1 Interrupções de curta duração

Definem-se as interrupções de curto prazo quando o valor eficaz da tensão é inferior a 10% da tensão declarada em todas as fases, com uma duração inferior a um minuto.

Causas

Em redes de média tensão são provocadas pela ação de dispositivos destinados à proteção do sistema de curto-circuito.

Efeitos

- Interrupção de processos e equipamentos;
- Saída e reinício do sistema;
- Desprogramação em controladores lógicos programáveis (PLC) e em equipamentos eletrônicos;

- Desligamento de sistemas de iluminação
- Queda no sistema de telefonia.

Metodologia de avaliação

Como a duração deste tipo de eventos é de menos de um minuto, conforme os regulamentos atuais não são considerados no cálculo da confiabilidade e continuidade do serviço. Portanto, recomenda-se um período de medição de uma semana.

Valores de referência

Cerca de 70% das interrupções de curta duração podem ser inferiores a 1 segundo.

Resultados obtidos nas medições

Como pode ser observado nas Figuras 5, 6 e 7, não foram encontradas interrupções deste tipo nas medições realizadas.

2.4.2 Afundamentos de tensão

Os afundamentos de tensão (SAGS) são reduções súbitas no valor eficaz da tensão entre 10% e 90% da tensão, seguida do retorno a um valor maior de 90% em um tempo que varia desde os 8,33 milissegundos até um minuto.

Causas

Geralmente são causados por correntes elevadas geradas em curtos-circuitos, em conexões ou operações de cargas que requerem demanda de potência elevada. Têm um comportamento imprevisível e aleatório. Produzem um maior impacto sobre o equipamento instalado no sistema elétrico e dependem da configuração do sistema, da operação do mesmo, o do ponto de medição e manutenção, entre outros. Algumas causas características são:

- Falha na fonte de alimentação do sistema de potência, dos sistemas elétricos próprios ou próximos;
- Partida do motor;
- Curto-circuito nos sistemas de energia causados por fenômenos naturais, como árvores, raios, ações de terceiros.

Efeitos

- Interrupção de processos;
- Redução da luz visível em alguns dispositivos de iluminação;
- Queda do sistema de telefonia;
- Funcionamento inadequado do equipamento;
- Saída de operação dos controladores de motores;
- Aumento das perdas por aquecimento em motores de indução devido ao aumento da corrente;
- Mudança da velocidade nas máquinas de indução;
- Saída de operação de equipamento como computadores e controladores eletrônicos;
- Redução da potência de saída em bancos de capacitores.

Metodologia de avaliação

A intensidade dos afundamentos de tensão foi determinada pela sua duração e magnitude. A duração foi definida como o tempo que toma o valor eficaz da tensão em por abaixo do limite de 10% até que retorna a um valor maior de 90%. Por outra parte, a magnitude foi dada pelo desvio máximo do valor eficaz da tensão da fase mais afetados, entre as três fases, sua duração foi dada pelo tempo de início e de fim do evento.

Valores de referência

A Norma Técnica Colombiana NTC 5001 não considera valores de referência, e sugere a elaboração de cartas de profundidade dos afundamentos (SAGS).

Resultados obtidos nas medições

As Figuras 5, 6 e 7 não mostram presença de afundamentos de tensão (SAGS) nos resultados.

2.4.3 Elevações de tensão

As elevações de tensão (SWELLS) são incrementos rápidos do valor eficaz da tensão acima de 110% da tensão. As sobretensões podem ter uma duração de 8,33 milissegundos até um

minuto. A duração da elevação da tensão é definida como o tempo que toma o valor eficaz em superar o limite até ser inferior ao mesmo.

Causas

As elevações podem ser produzidas por curtos-circuitos, saídas de carga ou de fenômenos de ressonância e ferrossonância. Outras causas envolvem:

- Operação de grandes fontes de alimentação interrupta (UPS);
- Operação de cargas controladas por tiristores;
- Funcionamento de atenuadores;
- Soldagem de arco.

Efeitos

- Falha dos componentes de um equipamento, dependendo da frequência de ocorrência do evento;
- Redução da vida útil de dispositivos eletrônicos, incluindo variadores de velocidade, computadores, condutores, barramentos, transformadores de tensão e corrente, bem como máquinas rotativas;
- Operações indesejadas em relés de proteção;
- Aumento da luz visível em alguns dispositivos de iluminação;
- Degradação de alguns dispositivos de proteção;
- Protuberância na caixa de capacitores em bancos de controle de reagentes;
- Falha imediata em dispositivos eletrônicos;
- Redução da vida útil dos equipamentos;
- Aumento na potência de saída em bancos de capacitores.

Metodologia de avaliação

As elevações de tensão são caracterizadas por dois parâmetros: a duração e a magnitude. A primeira é definida como o tempo que toma o valor eficaz da tensão em exceder o limite até o momento em que retorna a ser inferior do mesmo. A magnitude da elevação é dada pelo valor máximo da tensão eficaz medido durante a elevação em qualquer fase.

Valores de referência

A regulação não contempla valores de referência para as elevações de tensão.

Resultados obtidos nas medições

De acordo com as Figuras 5, 6 e 7, pode-se observar que não foram encontradas elevações de tensão (SWELLS) nos resultados.

2.4.4 Variações de frequência

A frequência nominal da tensão de alimentação é de 60 Hz, determinada pela velocidade de rotação dos alternadores nas usinas de geração elétrica.

Causas

O sistema pode estar exposto a variações temporais produzidas por curtos-circuitos ou alterações na carga durante a geração, cuja amplitude e duração dependem da gravidade da perturbação.

Efeitos

- Erros de sincronização de frequência, produzidos pelos usuários que têm cargas de grandes retificadores;
- Funcionamento errôneo de equipamentos eletrônicos

Metodologia de avaliação

O período de medição foi de uma semana, registrando os valores de frequência a cada 10 minutos e agrupando-os por um período de uma semana. Este esquema permite a possibilidade de determinação dos percentis de 95% e dos valores máximos e mínimos, excluindo os valores frequência durante os períodos de interrupções de serviço. Também, realizam-se a verificação se os valores estão dentro dos valores permitidos.

Valores de referência

Os valores de referência são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Valores de referência das Variações de frequência.

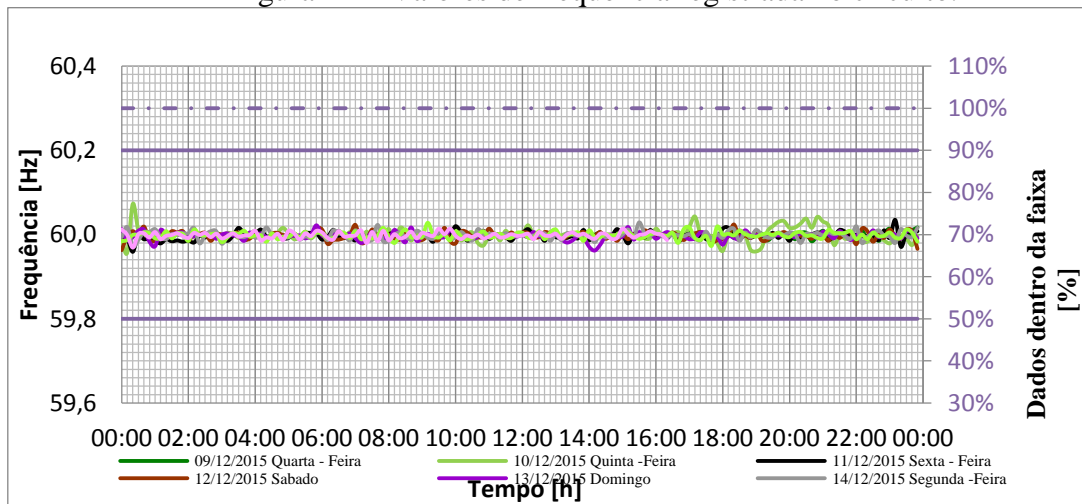
Tipo de Rede	Frequência aceitável para 95% dos dados obtidos por uma semana	Frequência aceitável para 100% dos dados obtidos por uma semana
Redes acopladas por conexões síncronas para um sistema interligado	Todos acima de 59,8 Hz e sob 60,2 Hz	Todos acima de 57,5 Hz e sob 63,0 Hz
Redes sem conexão síncrona para um sistema interligado	Todos acima de 59,8 Hz e sob 60,2 Hz	Todos acima de 51 Hz e sob 69,0 Hz

Fonte: Produção do próprio autor

Resultados obtidos nas medições

A frequência durante o tempo de monitoramento teve um valor máximo de 60,4 Hz e um mínimo de 59,9 valores que satisfaz os parâmetros necessários para o NTC 5001(Figura 21).

Figura 21 - Valores de frequência registrada no circuito.



Fonte: Produção do próprio autor

2.5 PERTURBAÇÕES RÁPIDAS

2.5.1 Sobretensões transitórias

São perturbações de duração muito curta, tipicamente menos da metade do ciclo, a partir de alguns microssegundos (μS) até de vários milissegundos (ms). As sobretensões transitórias

podem ser de impulso ou oscilatórias, e podem afetar o isolamento dos equipamentos ou componentes eletrônicos.

Causas

- Operações em linhas e equipamentos do sistema, especialmente a energização de bancos de capacitores resultantes de oscilações amortecidas sobreposto na onda fundamental. A frequência de oscilação varia de 100 Hz até 9 kHz.
- Descargas atmosféricas que podem gerar pulsos unidirecionais, com um tempo de crescimento na ordem de 1 μ s e um valor de pico atingindo 10 kV até 20 kV.
- Alta frequência em tiristores;
- Falha nos condutores elétricos e interruptores;
- Acionamento de relés e contatos;
- Desconexão e partida de carga com alto consumo de energia.

Efeitos

- Degradação ou falha imediata do isolamento em todos os tipos de equipamento;
- Diminuição das características do tempo médio entre falhas do equipamento;
- Falha nos componentes das fontes de alimentação de equipamentos eletrônicos;
- Desconexão dos variadores de velocidade ajustável;
- Danos em discos rígidos e perda de memória.

Metodologia de avaliação

Para medir a onda de tensão e o valor pico instantâneo deve se utilizar um dispositivo com uma banda larga maior à frequência do evento considerado.

Valores de referência

Os valores das sobretensões transitórias em circuitos abertos em instalações são geralmente limitados a 6 kV no interior e entre 10 kV e 20 kV no exterior. Estes valores são definidos em função da tensão de isolamento das instalações de baixa tensão.

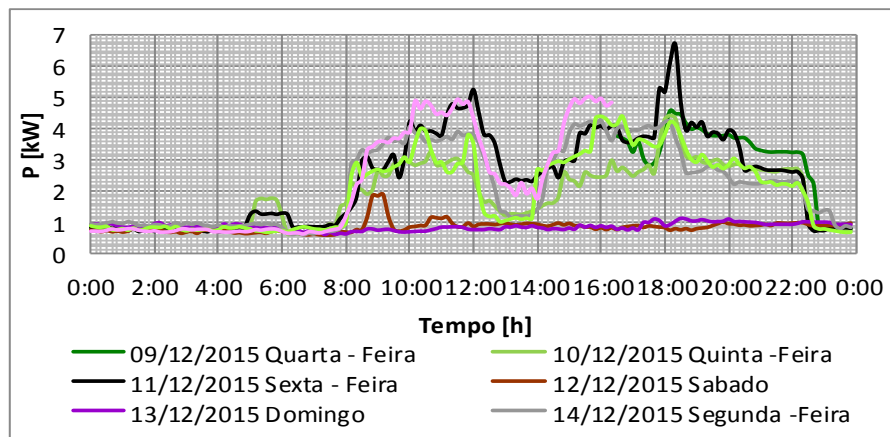
Resultados obtidos nas medições

De acordo com as Figuras 5, 6 e 7, não foram encontradas sobretensões transitórias nos resultados.

2.5.2 Potência ativa, reativa e aparente.

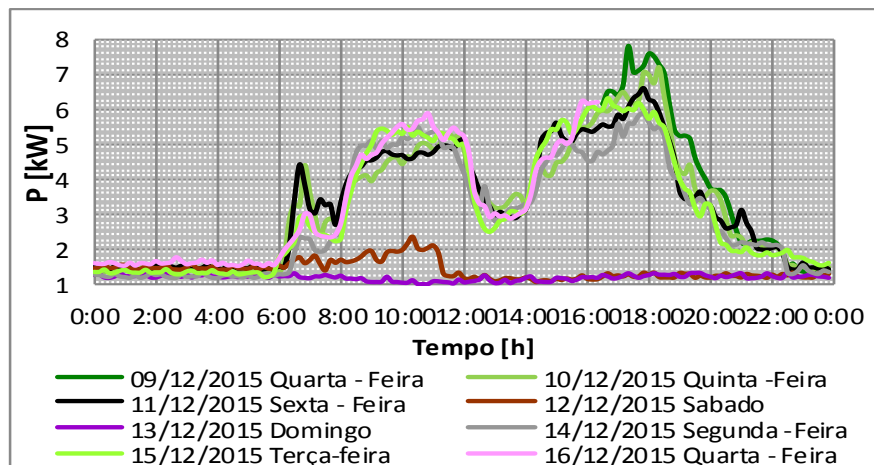
As Figuras 22, 23 e 24 apresentam as potências ativas nas três linhas durante o período das atividades acadêmicas. Observam-se que a potência foi desigual para as três fases, cujo valor médio foi de 5 kW para linha U₁, 7,5 kW para linha U₂ e 8,5 kW para linha U₃. Nos períodos de recesso das atividades acadêmicas, a demanda de potência permaneceu constante por volta de 1,2 kW.

Figura 22 - Valores médios da potência ativa na linha U₁



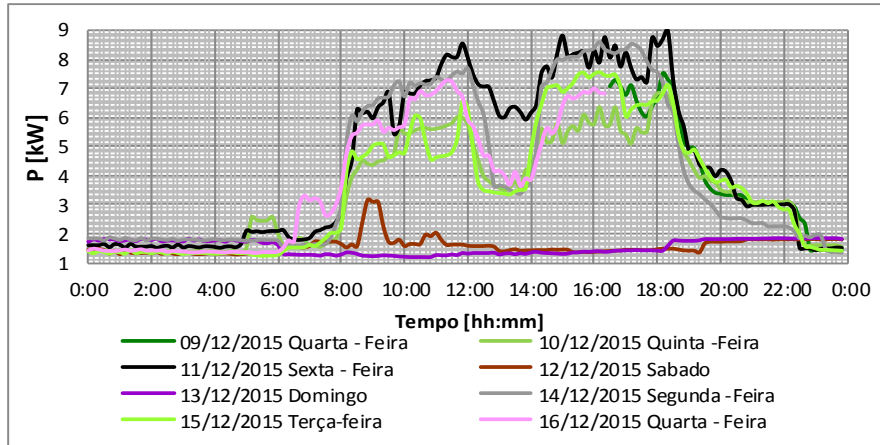
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 23 - Valores médios da potência ativa na linha U₂.



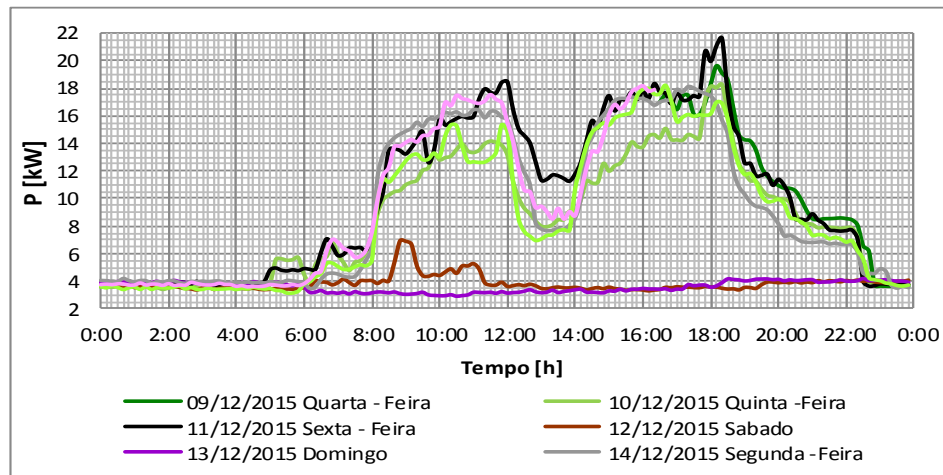
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 24 - Valores médios da potência ativa na linha U₃.



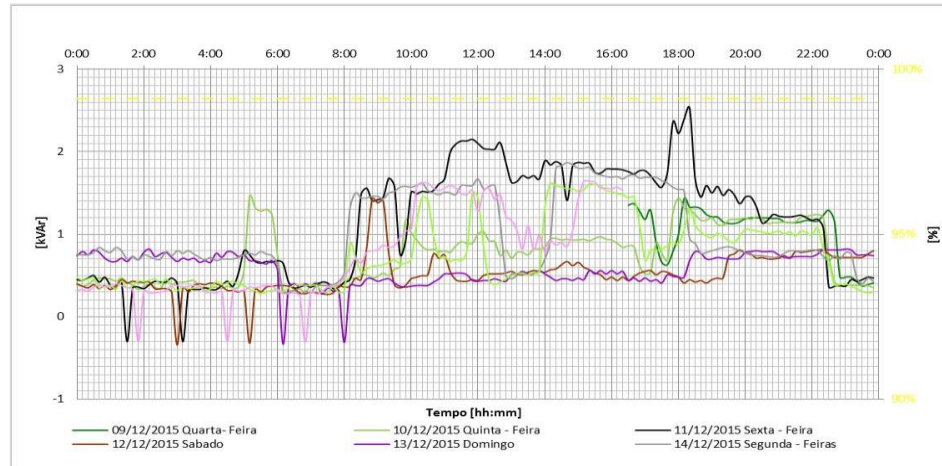
A potência ativa total mais alta foi de 21,8 kW durante o período de atividades acadêmicas e de 4 kW, quase constante, durante o período de recesso (vide Figura 25).

Figura 25 - Valores média da potência ativa total, Circuito 1.



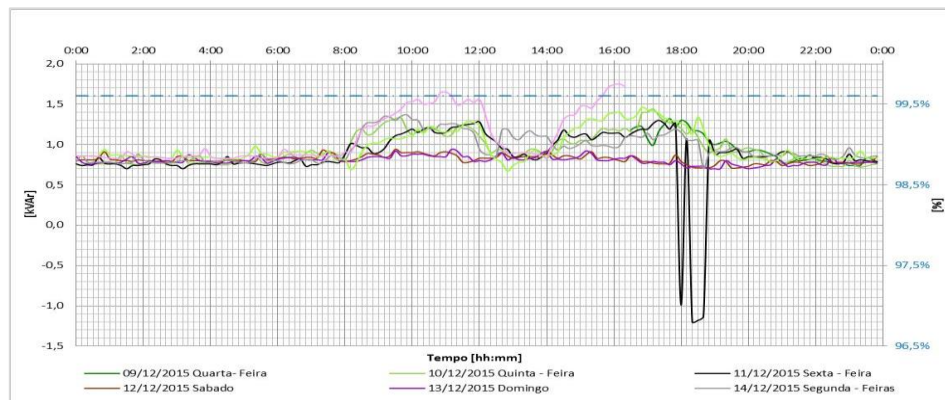
As Figuras 26, 27 e 28 apresentam as medições de potência reativa. Na linha U₁, 99,11% da potência reativa é de caráter indutivo, máxima de 2,53 kVAr na sexta-feira 11 de dezembro de 2015 às 18h20min. Na linha U₂, 99,6% é também de caráter indutivo, máxima de 1,75 kVAr na quarta-feira 16 de Dezembro de 2015 às 16h20min. Por último, na linha U₃ 99,11% da potência reativa é de caráter capacitivo, máxima de 1,34 kVAr na sexta-feira 11 de dezembro de 2015 às 18h20min.

Figura 26 - Valores médios da potência reativa na linha U₁.



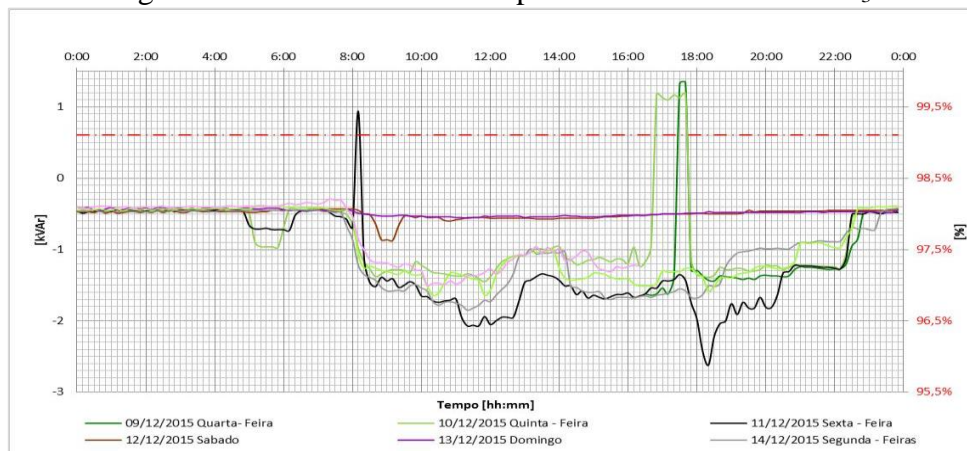
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 27 - Valores médios da potência reativa na linha U₂.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 28 - Valores médios da potência reativa na linha U₃.



Fonte: Produção do próprio autor

Durante o período de atividades acadêmicas a potência reativa total atinge valores máximos indutivos de 5,79 kVAR e capacitivos de -6,22 kVAR, na sexta-feira 11 de dezembro de 2015 às 18h (vide figura 29).

Figura 29 - Valores média da potência reativa total, Circuito 1.

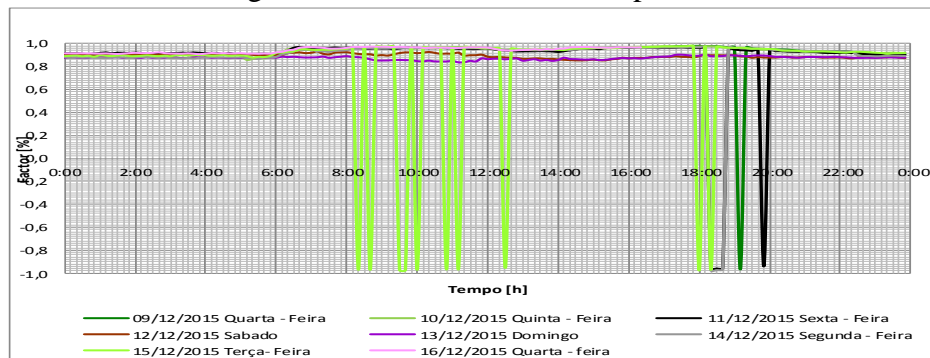


Fonte: Produção do próprio autor

2.5.3 Fatores de potência

De acordo com a legislação existente, o fator de potência deve ser maior de 0,9. Esta condição é satisfeita durante o período de atividades acadêmicas, como observado na Figura 30. Por sua vez, o fator de potência indutivo máximo foi 0,9809 na quarta-feira entre às 9h às 17h50min; o mínimo foi de 0,8591 na quinta-feira às 5h10min. O fator de potência capacitivo máximo foi 0,9770 na terça-feira às 18h; o mínimo foi 0,9412 na sexta-feira às 19h50min. Nota-se que existem problemas de fator de potência em alguns dias da semana.

Figura 30 - Valores do fator de potência total.



Fonte: Produção do próprio autor

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (SFCR)

Este capítulo descreve uma metodologia para calcular os componentes do SFCR, cuja potência foi de 7,8 kWp, baseado nos requerimentos específicos do usuário. O sistema foi instalado na Universidade de Ibagué, na Colômbia, e está em funcionamento desde o dia 20 de fevereiro de 2016 junto com outro sistema que monitora os parâmetros de projeto de forma contínua. Estes parâmetros são descritos nas seguintes seções.

3.1 DETERMINAÇÕES DAS HORAS DE SOL PLENO (HSP)

Este parâmetro faz referência à ocorrência em número de horas por dia de uma irradiação constante de 1000 W/m² a uma temperatura de 25°C (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009). Os valores da HSP variam com o local e época do ano devido às variações da radiação solar; geralmente, os valores são fornecidos como médias anuais e mensais. Para dimensionar SFCR utilizam-se os dados mensais, especialmente quando existem estações de medição.

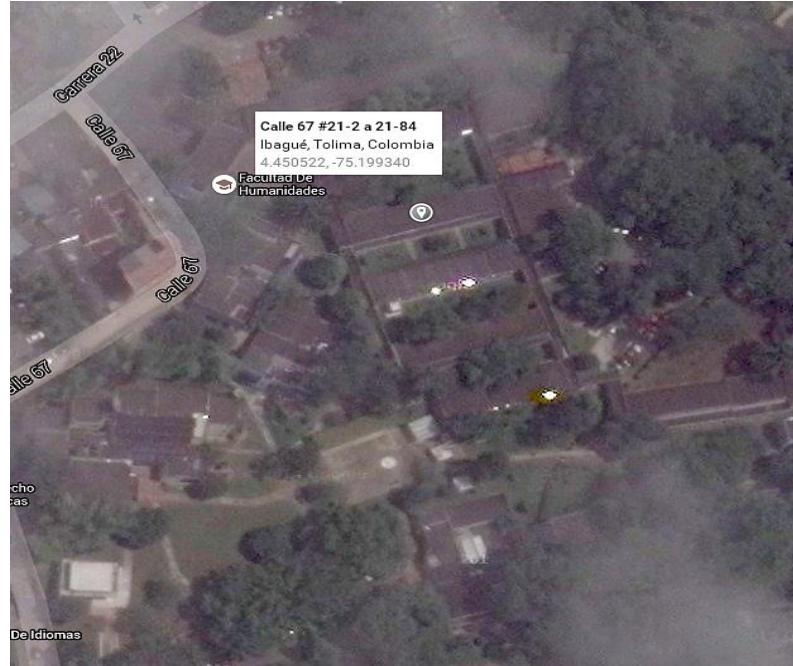
No caso específico da cidade de Ibagué, existem quatro estações meteorológicas que registram diretamente a radiação solar incidente. O Aeroporto José Perales, a Corporação Autônoma Regional do Tolima (CORTOLIMA), a Universidade de Ibagué e a Fazenda La Ceiba. Para este projeto foram utilizados dados das duas últimas estações mencionadas, marca Davis Vantagem Pro 2 Plus, de propriedade da Universidade de Ibagué e da Fazenda La Ceiba, respectivamente.

Os dados considerados correspondem aos dados registrados entre 2010 e 2015. Por se tratar de dados reais, descarta-se alguma estimativa matemática no dimensionamento do SFCR. Em total foram analisados 60 mil dados de cada estação para a determinação das HSP e da radiação solar média, permitindo comparar informações entre estações com unidades de radiação e frequências de registro diferente.

A Universidade de Ibagué está localizada no estado de Tolima, na região central andina. A Figura 31 apresenta uma vista aérea. As coordenadas são 4°45'05" de latitude norte e 75°19'93" de longitude oeste, uma altitude de 1.250 metros acima do nível do mar e uma temperatura média

de 22 graus Celsius. Nota-se a presença de vários prédios e o elevado potencial de sombra devido à vegetação no campus.

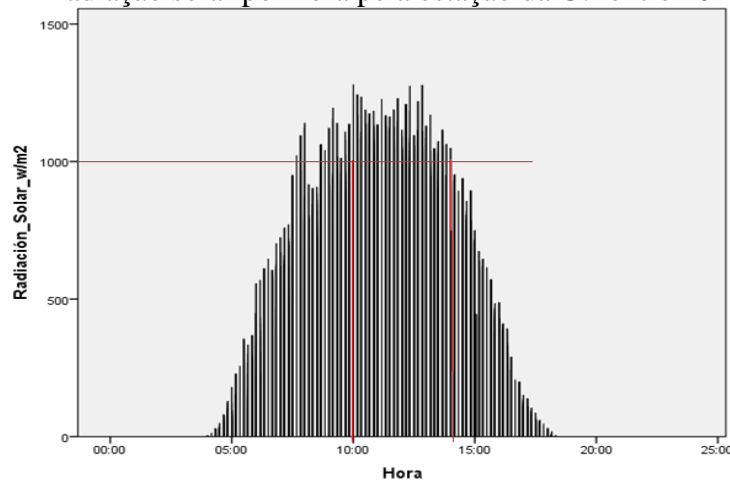
Figura 31 - Localização da Universidade de Ibagué - Colômbia



Fonte: Produção do próprio autor

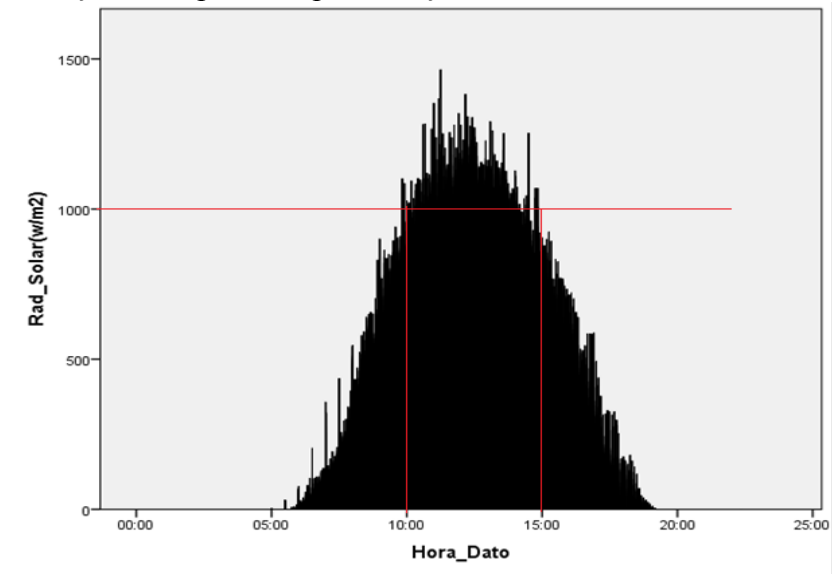
A radiação solar registrada nas duas estações foi apresentada nas Figuras 32 e 33. Observam-se que no período de tempo considerado, a maior parte da radiação solar na cidade de Ibagué ocorre na faixa entre as 10h e as 15h aproximadamente.

Figura 32 - Radiação solar por hora pela estação da U.I entre 2010 e 2015.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 33 - Radiação solar por hora pela estação a Fazenda “La Ceiba” entre 2010 e 2015.



Fonte: Produção do próprio autor

Deste modo foi possível determinar um valor representativo para as HSP. O valor médio anual, no caso da cidade de Ibagué, corresponde a 4,86 horas para uma radiação solar média de 4,79 kWh/m²/dia, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - HSP por mês na cidade de Ibagué entre 2010 e 2015

Mês	Radiação solar média [W/m ²]	Radiação solar média [kWh/m ² /dia]	HSP [h]
Janeiro	998	4,97	4,98
Fevereiro	1.012	5,18	5,12
Março	992	4,88	4,92
Abril	1.010	5,15	5,10
Maio	996	4,94	4,96
Junho	956	4,37	4,57
Julho	972	4,59	4,72
Agosto	964	4,48	4,65
Setembro	1020	5,30	5,20
Outubro	978	4,67	4,78
Novembro	980	4,70	4,80
Dezembro	950	4,28	4,51
Anual	986	4,79	4,86

Fonte: Produção do próprio autor

Conforme o atlas de radiação solar, publicado pela Unidade de Planejamento de Minas e Energia (UPME) da Colômbia, a disponibilidade de HSP na cidade de Ibagué está na faixa entre 4 e 5 horas (UPME, 2015). Do mesmo modo, existe uma disponibilidade de 5 a 6 horas de radiação solar.

Por outra parte, os dados mencionados podem ser comparados com outros obtidos de um estudo realizado para a cidade de Bogotá, próxima à cidade de Ibagué. Com dados de oito estações meteorológicas, as HSP anual determinado foram 4,31 horas durante o ano 2010 (VALLEJO; HERNANDEZ; SAENZ, 2010). Isto sugere que os valores das HSP, tanto anual quanto mensal, para a cidade de Ibagué estão dentro dos limites encontrados.

Finalmente, os programas computacionais CLIMWAT 2.0 e Restscreen da Organização para a Alimentação e Agricultura, (FAO), foram utilizados para verificara correspondência dos dados encontrados com informações do ano 2015. A base de dados, criada pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), apresenta para o aeroporto Perales da cidade de Ibagué um valor entre 5 e 6 horas, com uma radiação média anual de 5,77 kWh/m²/dia (RETSCREEN, 2015). Este valor é próximo das medições realizadas nas estações (vide Tabela 8).

Tabela 8 - Dados de HSP na cidade de Ibagué durante o ano 2015.

Mês	Temperatura do Ar [°C]	Umidade [%]	Vento [m/s]	Radiação média [kWh/m ² /dia]	HSP [h]
Janeiro	26,9	75,4	4,6	5,65	5,65
Fevereiro	26,8	75,4	3,8	6,57	6,57
Março	27,1	76,7	3,1	6,88	6,88
Abril	27,6	78,9	3,4	6,30	6,30
Mai	27,9	77,6	5,5	5,41	5,41
Junho	27,4	76,5	5,4	5,16	5,16
Julho	27	76,4	4,4	5,53	5,53
Agosto	26,8	77,9	4,4	5,69	5,69
Setembro	26,9	77,6	4,9	5,77	5,77
Outubro	26,8	78,9	4,7	5,93	5,93
Novembro	26,8	79,3	3,8	5,27	5,27
Dezembro	26,9	77,3	4,0	5,11	5,11
Média	27,1	77,3	4,3	5,77	5,77

Fonte: Produção do próprio autor

3.2 DIMENSIONAMENTOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

A metodologia para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, como uma opção para geração distribuída em redes de baixa tensão, foi baseada em três estudos de caso, desenvolvidos na Universidade Nacional da Colômbia (MORA, 2012) e na Universidade Francisco José de Caldas (PATIÑO; TELLO; HERNÁNDEZ, 2013). Adicionalmente, os cálculos também seguiram a metodologia utilizada pela Universidade do Minho (CARNEIRO, 2009).

Porque a intensidade da radiação solar varia e está disponível apenas num intervalo de tempo ao longo do dia, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico deve considerar a energia requerida pela demanda e a quantidade de horas de operação. O dimensionamento da fonte de alimentação precisa do fornecimento de corrente contínua.

3.2.1 Painéis Fotovoltaicos

Também chamados de geradores fotovoltaicos (GFV), são compostos por células fotovoltaicas de menor tamanho instaladas em uma estrutura ou suporte. Geralmente são fabricados para tensões nominais de 12 e 24 Volts. A potência do gerador é determinada pela equação 11 (HERNÁNDEZ; GÓMEZ; ROCHA, 2012).

$$PGFV = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{E_i}{HSPi \times Ni \times PR \times 12} \right] \quad (11)$$

Onde:

$PGFV$ = Potência do gerador fotovoltaico em kWh;

E_i = Produção média da eletricidade mensal, em kWh/mês. Calculada dividindo por doze a quantidade de energia consumida pela carga durante um ano;

$HSPi$ = Número de Horas de Sol Pleno da localidade;

Ni = Número de dias do mês;

PR = Fator de rendimento do sistema, na faixa entre 0,8 e 0,9. Toma conta das perdas por defeitos de fabricação dos painéis, efeitos de temperatura, sujeira, conexões inadequadas, entre outras, que correspondem a 10 ou 20%, aproximadamente.

3.2.2 Inversores

O termo “inversor” é utilizado normalmente para se referir ao conversor da corrente contínua (CC) do sistema fotovoltaico em corrente alternada (CA) com as características da rede elétrica. Os fabricantes de equipamentos de conversão de energia devem garantir o cumprimento dos padrões internacionais para um funcionamento adequado dos SFCR, tais como o IEEE STD 929 (2000), o AUSTRALIAN STD EL42 (2000) e o IEC STD 61724 (1995).

Atualmente, os inversores fazem a sincronismo com a rede de forma automática, considerando parâmetros como a potência nominal, a frequência, a tensão de entrada e tensão de saída. Como características adicionais, os inversores têm:

- Compatibilidade com diferentes tipos de tecnologia de painéis fotovoltaicos;
- Seguidor do ponto de potência máxima (SPPT) do gerador fotovoltaico. O SPPT não é um seguidor solar, mas um sistema totalmente eletrônico que varia o ponto elétrico de operação dos painéis fotovoltaicos permitindo o fornecimento da potência máxima;
- Longa vida útil;
- Expansibilidade, isto é, conexão com outros inversores em paralelo;
- Melhores características das proteção;
- Baixa influência sobre a distorção harmônica do sinal.

As características técnicas do inversor, como a entrada de tensão em CC, determinam a forma de conexão dos painéis com o inversor, devido a que os fabricantes utilizam níveis diferentes de tensão para um melhor desempenho. No dimensionamento do inversor define-se um tamanho relativo gerador-inversor, de forma que capacidade do gerador fotovoltaico seja maior que do inversor, principalmente pelas seguintes razões:

- Custo reduzido do sistema (pequenos inversores), sem afetar significativamente sua eficiência energética;
- A potência nominal do gerador corresponde às condições Nominais;
- A potência nominal do inversor na saída é dada em corrente alternada AC, em seguida, o gerador, além de entregar a potência de saída também deve compensar as perdas do inversor;
- A variação da irradiação durante o dia (e o ano, para países com estações) não permite ao sistema operar nos valores nominais a maior parte do tempo;
- A potência inicial do inversor está, geralmente, entre 5 e 10% da potência nominal.

No caso de uma potência menor, é mais fácil ligar o inversor, já que a irradiância é baixa durante a manhã. Portanto, define-se o fator de dimensionamento do inversor (FDI) usando a Equação 12 (HERNÁNDEZ; GÓMEZ; ROCHA, 2012):

$$FDI = \frac{P_{Inversor}}{P_{Gerador}} = \frac{P_I}{P_G} \quad (12)$$

Onde:

P_I = Potência do inversor, em kW

P_G = Potência do Gerador, em kW.

No entanto, o dimensionamento é um assunto de profunda pesquisa. Uma recomendação baseada em vidências empíricas sugere um fator de dimensionamento entre 0,8 e 1 (CAAMAÑO, 1998; KELLER ; AFFOLTER, Solar Energy 50, 1-7; MONDOL; YOHANIS; NOROTN, Solar Energy 80, 1517-1539). Isto é indicado para as áreas de baixa variação de irradiância durante o ano, por exemplo, a Colômbia. Outros Autores recomendam que a potência máxima do inversor esteja na faixa entre 0,7 e 1,2 a potência do gerador.

No caso do sistema dimensionado, o fornecimento de energia total corresponde a 936 kWh/mês. Utilizando a equação 11 é possível calcular a potência do gerador fotovoltaico (PGFV) usando um valor de 5 horas de sol pleno na Universidade de Ibagué, durante os 30 dias do mês.

$$PGFV = \frac{\sum_{i=1}^1 \left[\frac{936 \text{ kWh/mes}}{5 \times 30 \times 0.8} \right]}{1} = 7,8 \text{ kW}$$

Logo, a potência do inversor é calculada com a Equação 12, utilizando um fator de dimensionamento (PDI) de 0.9:

$$P_I = PDI \times P_G = 0,9 \times 7,8 = 7,02 \text{ kW}$$

Na seleção do inversor foram exploradas diferentes alternativas, conforme na Tabela 9. Os resultados sugerem o inversor marca Fronius Primos, cuja potência nominal de saída é 7,6 kW e o rendimento máximo de 96,9%. A Tabela 9, apresenta a tensão de entrada máxima igual a 600 V, que atende as condições de potência necessária de 7,02 kW. A faixa potência de trabalho do inversor é calculada como segue:

$$0,7 * P_{FV} < P_{max}^{INV} < 1,2 * P_{FV}$$

$$P_{FV} = 7,8 \text{ kW}$$

$$0,7 * 7,8 \text{ kW} < 7,6 \text{ kW} < 1,2 * 7,8 \text{ kW}$$

$$5,46 \text{ kW} < 7,6 \text{ kW} < 9,36 \text{ kW}$$

O inversor selecionado está em conformidade com os critérios estabelecidos por normas.

Tabela 9 - Ficha técnica de diferentes inversores.

Tipo	Inversor de conexão a rede FORTEPLUS 10KT2/2	Inversor de conexão a rede SOLAREEDGE SE7600A-US	Inversor de conexão a rede PICO 7,0	Inversor de conexão a rede FRONIUS Primo 7.6-1
Corrente de carga máxima	30 A	32 A	22 A	18 A/18A
Tensão máxima de entrada	850 V	1.000 V	1.000 V	600 V
Faixa de tensão	300 – 800 V	208 – 350 V	330 – 660 V	250 – 480 V
Tensão nominal de entrada	230 V	500 V	680 V	420 V
Eficiência máxima	93,70%	97,5%	97,6 %	96,9 %
Potência nominal de saída	10.000 W	7.600 W	7.000 W	7.600 W
Faixa de temperatura de funcionamento	-	-	--	-40--+ 55°C
Tipo de proteção	-	-	IP IP 65	IP IP 65
Fator de Potência	-	-	-	0,85-1 ind./cap.
Dimensões [mm] (comprimento x largura x altura)	730 x 465 x 222	775 x 315 x 194	500 x 385 x 236	645 x 431 x 204
Peso	42,0 kg	24,7 kg	26,5 kg	21,5 kg
Preço (USD)	2.640	2.403	2553	2.150

Fonte: Produção do próprio autor

3.2.3 Números máximos de painéis que podem ser conectados em série (Ns)

O número de painéis a ser ligados em serie pode ser determinado com a Equação 13.

$$N_s < \frac{V_{max}^{INV}}{V_{ca(Módulo\ a-10^\circ C)}} \quad (13)$$

Onde:

N_s = Número máximo de painéis em série;

V_{max}^{INV} = Tensão máxima do inversor no lado de corrente contínua [V];

$V_{ca(Módulo\ a-10^\circ C)}$ = Tensão do circuito aberto do painel à temperatura de $-10^\circ C$ [V];

O último termo (a tensão em circuito aberto do painel à temperatura de $-10^\circ C$) é calculado com a Equação 14:

$$V_{ca(Módulo\ a-10^\circ C)} = \left(V_{ca(CTS)} - \frac{35^\circ C * \Delta V_{(mV/^\circ C)}}{1000} \right) \quad (14)$$

Onde:

$V_{ca(CTS)}$ = Tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico [V];

$\Delta V_{(mV/^\circ C)}$ = Coeficiente de tensão diferencial [mV/°C];

Os valores na Equação 14 foram selecionados a partir das informações técnicas apresentadas na Tabela 10, onde se observa que a tensão $V_{ca(CST)}$ é de 38,1 V. Por sua vez, o Coeficiente de temperatura V_{oc} é obtido da Tabela 9 e o valor da tensão de entrada máxima do inversor V_{max}^{INV} igual a 600 V.

$$V_{ca(Módulo\ a-10^\circ C)} = \left(38,1\ V - \frac{35^\circ C * -121,7\ \frac{mV}{^\circ C}}{1000} \right)$$

$$V_{ca(Painel\ a-10^\circ C)} = 42,36\ V$$

Logo,

$$N_s < \frac{600\ V}{42,36\ V}$$

$$N_s < 14,16$$

O número máximo de painéis que podem ser conectados em série de acordo com a Equação 13, deve ser inferior a 14,16. No caso da rede experimental, foi determinado um número de dez e que atende as condições de N_s .

3.2.4 Tensão de trabalho (U).

A tensão de trabalho é calculada a partir da Equação 15:

$$U = N_s * V_{ca(Módulo\ a-10^{\circ}C)} \quad (15)$$

$$U = 10 * 42,36 V$$

$$U = 423,6 V$$

Tabela 10 - Informação técnica de diferentes painéis fotovoltaicos

Tipo	Painel solar INTI IPS- 240	Painel solar KYOCERA KD 200-60 F series	Painel solar YINGLI JS145 series	Painel solar IBC SOLAR Polysol 260 CS
Potência	240 W	250 W	145 W	260 W
Tensão de máxima potência	30,72 V	29,8 V	18,2 V	31,1 V
Corrente de máxima potência	7,81 A	8,39 A	7,77 A	8,37 A
Tensão em circuito aberto $V_{ca(CST)}$	36,6 V	36,9 V	22,3 V	38,1 V
Corrente em curto circuito (A_{sc})	8,36 A	9,09 A	8,3 A	8,98 A
Eficiência do painel	14,78 %	14,9 %	14,5 %	15,9 %
Coefficiente de temperatura V_{oc} (mV/°C)	-120.7	-117.7	-122.8	-121.7
Peso (kg)	18,6	20	10,8	20,5
Dimensões (LxWxH) em (mm)	1640 x990 x40	1660 x990 x46	1470 x 680 x 25	1650 x 992 x 45
Preço (USD)	276	307	320	274

Fonte: Produção do próprio autor

Condições de teste padrão (STC): 1000 W/m² de irradiação, 25°C de temperatura das células, AM 1.5 espectro.

3.2.5 Números mínimos de painéis que podem ser conectados em série

O número mínimo de painel a ser ligados em serie foi obtido a partir da Equação 16:

$$N_{smin} > \frac{V_{min}^{INV}}{V_{max(Módulo\ a\ 70^{\circ}C)}} \quad (16)$$

Onde:

N_{smin} = Número mínimo de painéis que podem ser ligados em série;

V_{min}^{INV} = Tensão mínima do inversor [V];

$V_{max(Módulo\ a\ 70^{\circ}C)}$ = Tensão máxima do painel á temperatura de 70°C (Equação17).

Da Tabela 10, obtém-se o valor da tensão de máxima potência $V_{max(CTS)} = 31,1$ V, e da Tabela 9, o valor da tensão mínima do inversor $V_{min}^{INV} = 250$ volt.

$$V_{max(Módulo\ a\ 70^{\circ}C)} = \left(V_{max(CTS)} + \frac{35^{\circ}C * \Delta V_{(mV/^{\circ}C)}}{1000} \right) \quad (17)$$

$$V_{max(Módulo\ a\ 70^{\circ}C)} = \left(31,1\ V + \frac{35^{\circ}C * -121,7}{1000} \right)$$

$$V_{max(Módulo\ a\ 70^{\circ}C)} = 26,84\ V$$

$$N_{smin} > \frac{250\ V}{26,84\ V}$$

$$N_{smin} > 9,31$$

Assim, o número mínimo de painéis que podem ser ligados em série deve ser maior do que 9,31. Portanto, o número selecionado (dez) cumpre com as duas condições.

3.2.6 Números máximos de linhas ligadas em paralelo (N_p)

O número máximo de linhas em paralelo N_p é calculado a partir da equação 18.

$$N_p < \frac{I_{FV}}{I_{max}} \quad (18)$$

Onde:

I_{FV} = corrente de entrada do inversor [A];

I_{max} = corrente máxima dos painéis fotovoltaicos [A];

A corrente de entrada o inversor I_{FV} , é obtido a partir da equação 19:

$$I_{FV} = \frac{P_{max}^{INV}}{V_{INV}} \quad (19)$$

Onde:

P_{max}^{INV} = Potência máxima CC do inversor [W];

V_{INV} = Tensão máxima do inversor [V];

Os valores de V_{INV} e P_{max}^{INV} são obtidos a partir da Tabela 9, multiplicando a tensão nominal do inversor (420V) e a corrente de carga máxima. Como a entrada do inversor tem duas linhas, cada uma com 18A, o resultado deve se multiplicar por dois:

$$P_{max}^{INV} = 420V * 18A * 2 = 15120 W$$

$$V_{INV} = 600 V$$

$$I_{FV} = \frac{15120 W}{600 V}$$

$$I_{FV} = 25,2 A$$

Da Tabela 10, obtém-se o valor da corrente máxima do painel fotovoltaico:

$$I_{max} = 8,37 A.$$

$$N_p < \frac{25,2 A}{8,37 A}$$

$$N_p < 3,011$$

O número máximo de linhas em paralelo (N_p) deve ser menor do que 3,011. Portanto, para a rede experimental foi selecionado um valor de 3,0.

3.2.7 Intensidades de corrente de trabalho (I).

A intensidade da corrente de trabalho é obtida a partir da equação 20.

$$I = N_p * I_{max} \quad (20)$$

$$I = 3 * 8,37 A$$

$$I = 25,11 A$$

3.2.8 Potências do sistema fotovoltaico (P_{FV})

A potência do sistema fotovoltaico é calculada a partir da equação 21, considerando a tensão de trabalho (U) e a intensidade de trabalho (I):

$$P_{FV} = U * I \quad (21)$$

$$P_{FV} = 423,6 \text{ V} * 25,11 \text{ A}$$

$$P_{FV} = 10,637 \text{ kW}$$

3.2.9 Área requerida e número de painéis necessário para a rede experimental fotovoltaica.

O número de painéis fotovoltaicos N_m , é determinado com a equação 22:

$$N_m = N_S \times N_P \quad (22)$$

$$N_m = 10 \times 3 = 30$$

Portanto, o número de painéis fotovoltaicos para ser instalado foi de 30. Para encontrar a área necessária para a rede experimental fotovoltaica A_m , deve-se primeiro conhecer a área que ocupa um painel fotovoltaico A_m , a partir da equação 23.

$$A_m = W * L \quad (23)$$

Onde:

W = Largura do painel fotovoltaico [m];

L = Comprimento do painel fotovoltaico [m].

$$A_m = 0,992 \text{ m} * 1,650 \text{ m}$$

$$A_m = 1,637 \text{ m}^2$$

Cada painel fotovoltaico ocupa uma área de $1,637 \text{ m}^2$. Logo, a área requerida para a rede experimental do sistema fotovoltaico (A_r) é obtido a partir da equação 24.

$$A_r = N_m * A_m \quad (24)$$

$$A_r = 30 * 1,637 \text{ m}^2$$

$$A_r = 49,104 \text{ m}^2$$

3.3 CONDUTORES ELÉTRICOS

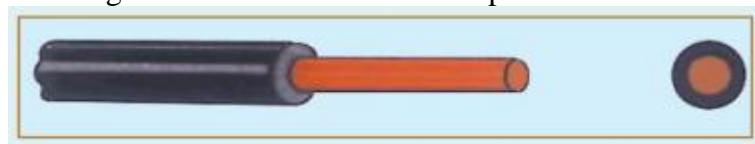
A partir da sua geração, a eletricidade é conduzida por meio de linhas de transmissão e redes de distribuição até aos centros de consumo. Os condutores elétricos são formados por um ou vários fios em conjunto, fabricados normalmente com cobre ou alumínio. Embora ambos os metais tenham excelente condutividade elétrica, o cobre possui notáveis vantagens mecânicas e elétricas. O tipo de cobre utilizado na fabricação de condutores elétricos é o cobre eletrolítico de elevada pureza (99,99%).

3.3.1 Partes dos condutores elétricos

Os condutores elétricos podem ser divididos em três partes: a alma, o isolamento e a capa protetora. A alma refere-se ao elemento condutor feito de cobre de sua estrutura depende sua classificação:

- O fio elétrico é um material maciço e flexível, formado por um único elemento. É utilizado em companhias aéreas, instalações elétricas ao ar livre, em dutos ou diretamente em isoladores (vide Figura 34).

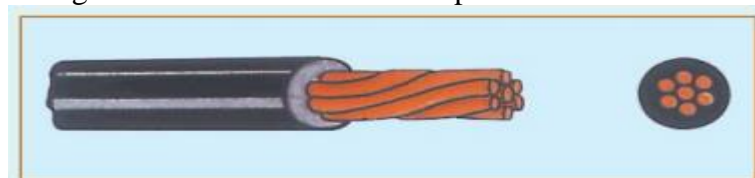
Figura 34 - Conductor elétrico tipo de fio



Fonte: Adaptado de GARCIA, 2015

- O cabo elétrico é constituído por vários fios encordoados, de baixa seção transversal, isolados ou não entre si (vide Figura 35).

Figura 35 - Conductor elétrico tipo de fio cabo

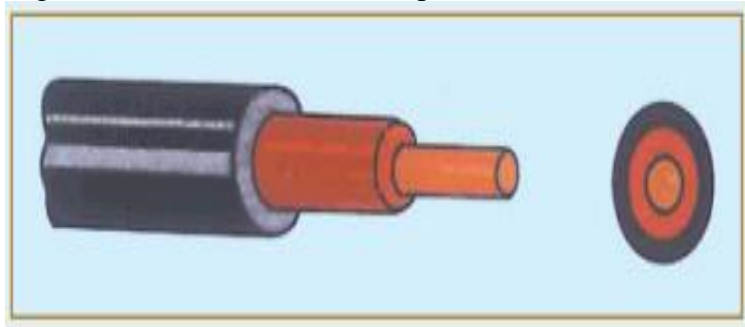


Fonte: Adaptado de GARCIA, 2015

Dependendo do número de condutores, a alma pode ser:

- Unipolares, com um único condutor de alma isolada, com ou sem tampa de proteção (vide Figura 36).

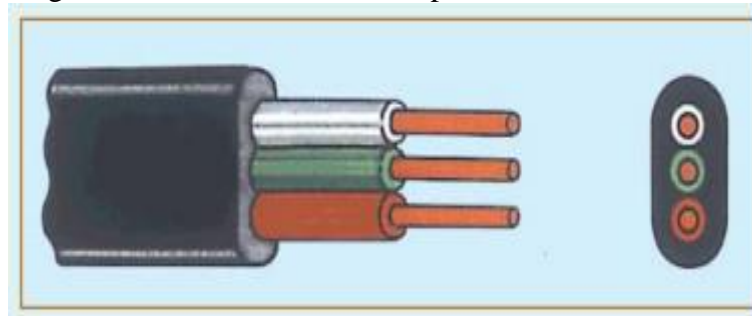
Figura 36 - Conductor elétrico tipo único condutor.



Fonte: Adaptado de GARCIA, 2015

- Multipolares, quando existem vários condutores de almas isoladas e coberturas de proteção (vide Figura 37).

Figura 37 - Conductor elétrico tipo multicondutor.

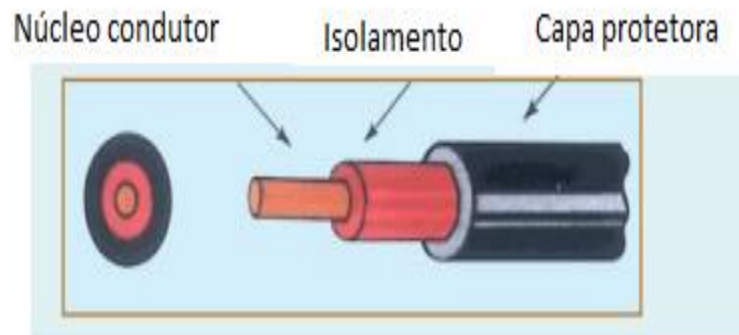


Fonte: Adaptado de GARCIA, 2015

O isolamento evita que a eletricidade entre em contato com pessoas, objetos, artefatos ou outros componentes de uma instalação (especialmente de tensão diferente). Os isolamentos são utilizados dependendo da aplicação, já que possuem variadas propriedades mecânicas e técnicas tais como resistência contra agentes químicos, luz solar, umidade, altas temperaturas, chamas, entre outros. Geralmente, os isolamentos são fabricados de materiais como o PVC ou cloreto de polivinilo, polietileno ou PE, borracha, borracha, neoprene e nylon.

Por último, a camada protetora cuida a integridade do isolamento e da alma condutora contra danos de origem mecânica. Se as proteções mecânicas são de aço, latão ou outro material durável é chamado de armadura (fio ou fios trançados). Os condutores podem ainda ser fornecidos como tipo de proteção elétrica formada por tiras de cobre ou de alumínio. No caso em que a proteção este já composta por fios de cobre é chamada de escudo (apresentado na Figura 38).

Figura 38 - Partes de um condutor elétrico



Fonte: Adaptado de GARCIA, 2015

3.3.2 Características técnicas e condições de uso dos condutores elétricos.

As Tabelas 11 e 12 apresentam as características técnicas e condições de uso dos condutores elétricos.

3.3.3 Dimensionamentos dos condutores elétricos

Na norma ANSI/IEEE C57.110-1986 recomenda-se que os equipamentos de potência que alimentam cargas não-lineares (em informática) devem operar como máximo a 80% da potência nominal. Isto significa que os cálculos são realizados, considerando uma potência na ordem de 120% da potência de trabalho em regime eficaz.

O correto dimensionamento dos condutores elétricos é importante e decisivo na operação dos sistemas de forma eficiente e confiável. De acordo com os resultados do dimensionamento, a rede experimental tem três linhas de dez painéis solares em cada um. A informação técnica foi resumida na Tabela 13.

Tabela 11 - Uso de condutores isolados com seções métricas

CONDIÇÕES DE USO PARA CONDUTORES ISOLADOS COM SEÇÕES MÉTRICAS (Fabricação de acordo com a norma VDE)

Tipo de Isolamento	Designação	Temperatura de operação (°C)	Tensão de serviço Max.	Condições de uso (Colocação fixa)
Condutor único de isolamento PVC	NYA	70	660 VCA 750 VCC	Instalações interiores em ambiente seco: dentro de tubos ou diretamente com isolamento.
Condutor único especial. Isolado PVC	NSYA	70	660 VCA 750 VCC	Em locais húmidos e ao ar livre, em linhas de entrada de casas, fixos protegidos em alimentação de máquinas, ferramentas e similares ou ligados a eles.
Cabo multicondutor, Isolamento e camada de PVC	NYC	70	660 VCA 750 VCC	Para instalar em locais secos e molhados ao ar livre sem ser exposto à luz solar, e calhas diretamente enterradas no solo e na água, com proteção adicional quando expostos a danos mecânicos.
Cabo plano multicondutor. Isolamento e camada de PVC	TPS NYIF NYIFY	70	660 VCA 750 VCC	Para instalações baixo telhado, a visão ou oculta, em nenhum caso pode descansar sobre material combustível.

Fonte: Produção do próprio autor

3.3.3.1 Dimensionamento por Intensidade de corrente Elétrica

A capacidade de transporte dos condutores é limitada pela capacidade de dissipar a temperatura do meio circundante, o isolamento não deve exceder a temperatura de serviço dos condutores, a temperatura ambiente e o número de condutores por tubulação é um fator relevante na capacidade de dissipação por parte dos condutores, a capacidade de transporte dos condutores foi obtida com a Equação 25.

$$I_t = \frac{I}{F_N \times F_T} \quad (25)$$

Onde:

I_t = Capacidade de transporte dos condutores, definida por o desenho [A];

F_N = Fator de correção por número de condutores;

F_T = Fator de correção por temperatura.

Os fatores de correção por quantidade de condutores (F_N) é calculado para um número de três (conforme a Tabela 14).

3.3.3.2 Dimensionamentos dos cabos para os painéis fotovoltaicos.

Os painéis fotovoltaicos têm quatro condutores (três positivos e um neutro), protegidos externamente com tubo NPT. Conforme a Equação 25 e as Tabelas 13, 14 e 15, a capacidade de transporte dos painéis, considerando uma variação de temperatura entre 30 e 40 °C na cidade de Ibagué foi calculada com a Equação 25.

$$I_t = \frac{8,37}{0,8 \times 0,88} = 11,89 A$$

Tabela 12 - Uso de condutores isolados com seções AWG.

CONDIÇÕES DE USO PARA CONDUTORES ISOLADOS COM SEÇÕES AWG (Fabricação de acordo com a norma UL o IPCEA)				
Tipo de Isolamento	Designação	Temperatura de operação (°C)	Tensão de serviço Max. Vca	Condições de Emprego (Colocação fixa)
Condutor único de isolamento PVC	T	60	600	Instalações interiores de ambiente seco, colocado dentro de tubos ou diretamente sobre isoladores.
Único condutor isolado em PVC, resistente à umidade.	THW	60	600	Id. mas para ambiente seco ou úmido e temperatura mais elevada.
Condutor único isolado de PVC e cobertura de nylon resistente à umidade, maior temperatura, os lubrificantes e combustíveis.	THHN	75	600	Id. THW, e para utilização em ambientes em que os lubrificantes e combustíveis são tratados.
Multicondutor Isolamento e jaqueta de PVC	TN-60	60	600	Para instalar em locais secos e molhados ao ar livre sem ser exposto à luz solar, e calhas diretamente enterradas no solo e na água, com proteção adicional quando expostos a danos mecânicos.

Fonte: Produção do próprio autor

Considerando uma temperatura de serviço de 75 °C, o calibre recomendado é AWG 14, cuja capacidade de transporte é de 15 A e sua área nominal é de 2,08 mm² (Tabela 16).

Tabela 13 - Parâmetros de desenho obtidos da rede experimental.

Parâmetros	Painel solar	Inversor
Tensão máxima (V)	311	208,2
Corrente máxima (A)	8,37	31,7
Tensão de circuito aberto (V)	381	-
Corrente de circuito fechado (A)	8,98	-
Frequência (Hz)	-	60
Potência (kVA)	-	7,6
Comprimento L ₁ (m)	10	40
Comprimento L ₂ (m)	10	40
Comprimento L ₃ (m)	10	-
Comprimento Neutro (m)	30	40
Resistividade do cobre 20°C (ohm*mm ² /m)	0,017241	0,017241

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 144 - Fator de correção por quantidade de condutores

Quantidade de Condutores	Fator
4 - 6	0,8
7 - 24	0,7
25 - 42	0,6
Maior de 42	0,5

Fonte: Produção do próprio autor

Por outra parte, o fator de correção por temperatura (F_T) é definido para valores de temperatura ambiente maiores de 30°C (vide Tabela 15).

Tabela 155 - Fator de correção por temperatura

Temperatura ambiente em °C	Temperatura de serviço	
	60 °C	75 °C
30 - 40	0,82	0,88
41 - 45	0,71	0,82
46 - 50	0,58	0,75
51 - 55	0,41	0,67
56 - 60	-	0,58
61 - 70	-	0,35

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 16 - Corrente admissível para condutores de cobre AWG.

Nominal (mm ²)	AWG	Grupo A			Grupo B		
		Temperatura de Serviço			Temperatura de Serviço		
		60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C
0,32	22	3	3	-	-	-	-
0,51	20	5	5	-	-	-	-
0,82	18	7,5	7,5	-	-	-	-
1,31	16	10	10	-	-	-	-
2,08	14	15	15	25	20	20	30
3,31	12	20	20	30	25	25	40
5,26	10	30	30	40	40	40	55
8,36	8	40	45	50	55	65	70
13,3	6	55	65	70	80	95	100
21,15	4	70	85	90	105	125	135
26,67	3	80	100	105	120	145	155
33,62	2	95	115	120	140	170	180
42,41	1	110	130	140	165	195	210
53,49	1/0	125	150	155	195	230	245

Fonte: Produção do próprio autor

Grupo A: Até 3 condutores em cano ou cabos diretamente enterrados

Grupo B: Conductor simples ao ar livre.

3.3.3.3 Dimensionamentos dos cabos elétricos após o inversor

Na saída do inversor, o cabo elétrico tem dois condutores positivos e um neutro, protegidos externamente com tubo NPT. O fator de correção por quantidade de condutores é FN = 1.0. Logo, utilizando a Equação 25, têm-se:

$$It = \frac{18}{1,0 \times 0,88} = 20,45 A$$

Na Tabela 16, nota-se que para uma temperatura de serviço de 75 °C o calibre recomendado é AWG 10. A capacidade de transporte em CA é de 30 A e uma área nominal de 5,25 mm².

3.3.3.4 Dimensionamentos por tensão elétrica

Ao conduzir uma corrente elétrica através dos condutores de uma instalação, gera-se nelas uma queda de tensão que pode ser calculada a partir da Equação 26:

$$\Delta V = I \times R_C \quad (26)$$

Onde:

ΔV = queda de tensão na linha [V];

I = Corrente de carga [A];

R_C = resistência dos condutores [Ω];

A resistência de um condutor elétrico (R_C), dada em Ohms (Ω), é calculada com a Equação 27. Esta expressão se relaciona os parâmetros físicos e a natureza do material do condutor:

$$R_C = \frac{2 \times \rho \times l}{A} \quad (27)$$

Onde:

ρ = Resistividade específica do condutor [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$];

l = Comprimento do condutor [m];

A = Área transversal do condutor [mm^2];

A queda de tensão do condutor foi determinada com a Equação 28 para corrente contínua, a Equação 29 para corrente alternada monofásica e a Equação 30 para corrente alterna trifásica:

$$\Delta V = \frac{2 \times \rho \times l \times I}{A} \quad (28)$$

$$\Delta V = \frac{2 \times \rho \times l \times I \times \cos\phi}{A} \quad (29)$$

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times \rho \times l \times I \times \cos\phi}{A} \quad (30)$$

3.3.3.5 Dimensionamentos do circuito por tensão elétrica em corrente contínua.

A norma IEEE sugere que a queda de tensão na linha não deve superar 3% da tensão nominal. Neste caso, a tensão nominal de cada painel foi de 31,1V (aumentando a 311 V para os dez painéis do sistema); portanto, a queda de tensão máxima permitida foi de 9,33V. Para dimensionar as linhas 1, 2, 3 e neutro do circuito em corrente contínua, utiliza-se a Equação 28.

Adicionalmente, são considerados a queda de tensão na linha, utilizando as informações fornecidas na Tabela 13 e 16, foi calculada como:

$$\Delta V = \frac{2 \times 0,017241 \times 28 \times 15}{2,08} = 6,96 \text{ V}$$

Logo, este resultado sugere a queda de tensão nas linhas é menor em relação ao valor permitido pela norma.

3.3.3.6 Dimensionamentos do circuito por tensão elétrica alternada.

O dimensionamento em corrente alternada é realizado através da Equação 29; os resultados são apresentados na Tabela 17. O valor do fator de potência ($\cos\phi$) foi determinado a partir de um estudo preliminar sobre o circuito, sendo igual a 0,90.

$$\Delta V = \frac{2 \times 0,017241 \times 40 \times 30 \times 0,9}{5,26} = 7,08 \text{ V}$$

Assim, nota-se que os circuitos elétricos em corrente alternada tem uma queda de tensão de 7,08V, inferior ao valor sugerido pela norma.

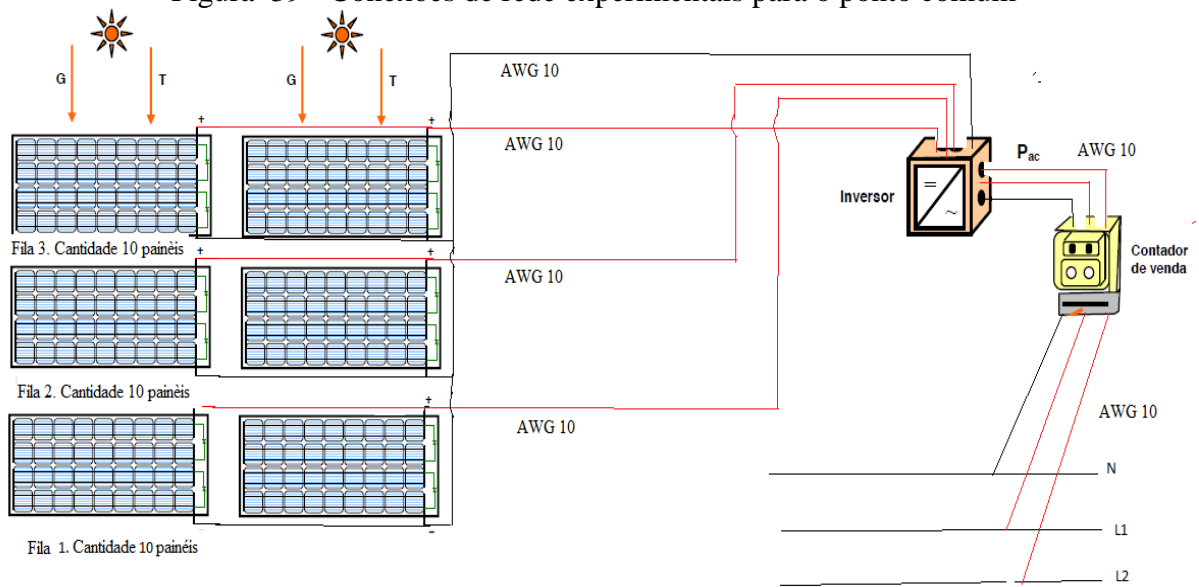
A seção transversal do cabo elétrico para a rede experimental foi determinada como 6 mm² (Tabela 16). Isto permite ter a possibilidade de aumentar o tamanho da rede e unificar o calibre do fio (vide Figura 39).

Tabela 17 - Seções transversais dos cabos obtidos e utilizados na rede experimental

Circuito CC	Requerimento conforme Norma AWG	Calibre Usado
L1	14	10
L2	14	10
L3	14	10
Neutro	14	10
Circuito AC		
L1	10	10
L2	10	10
Neutro	10	10

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 39 - Conexões de rede experimentais para o ponto comum



Fonte: Produção do próprio autor

4 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA REDE EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIÇÃO GERAL

O sistema foi instalado no mês de fevereiro do 2016 na Universidade de Ibagué - Colômbia. Possui 30 painéis fotovoltaicos marca IBC solar AG, de origem Alemão, com uma potência nominal de 260 W cada um com área de 1,64 m². Os dados técnicos são apresentados na Tabela 18, organizados por grupos.

Tabela 18 - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Dados gerais			Dados elétricos				Grupo
#	N° serial	Pmpp	Voc	Isc	Vmpp	Imp	
1	442412208966	264,14	38,01	9,13	30,89	8,55	C
2	442412208956	263,67	38,01	9,14	30,81	8,56	B
3	442412208965	264,00	38,06	9,16	30,89	8,55	B
4	342412209942	264,69	38,15	9,17	30,92	8,56	B
5	542412209676	264,46	38,10	9,11	30,86	8,57	A
6	442412209016	263,76	37,96	9,15	30,95	8,52	C
7	342412217031	264,61	38,06	9,18	30,79	8,60	A
8	442412209008	264,00	38,01	9,15	30,92	8,54	C
9	342412217077	264,39	38,00	9,18	30,85	8,57	A
10	342412209973	264,33	38,09	9,17	30,79	8,58	A
11	342412209975	264,46	38,04	9,16	30,81	8,58	A
12	342412217078	265,34	38,07	9,19	30,85	8,60	A
13	542412217651	264,21	38,05	9,14	30,98	8,53	C
14	442412209043	264,79	38,02	9,13	31,01	8,54	C
15	442412209045	264,88	38,03	9,13	30,97	8,55	B
16	342412217040	264,42	38,10	9,19	30,80	8,59	A
17	442412209044	264,39	38,03	9,13	30,94	8,55	C
18	442412209028	265,33	38,07	9,13	30,95	8,57	A
19	542412209362	264,58	38,05	9,14	30,96	8,55	C
20	342412217056	265,36	38,11	9,16	30,97	8,57	B
21	442412209029	265,25	38,09	9,15	30,92	8,58	A
22	442412209069	265,96	38,12	9,18	31,02	8,57	B
23	442412209064	264,60	38,07	9,15	30,91	8,56	B
24	542412209692	264,40	38,05	9,12	30,94	8,55	C
25	542412209689	263,71	38,05	9,10	30,86	8,55	C
26	342412209993	264,56	38,10	9,17	30,74	8,61	A
27	542412209679	265,02	38,04	9,15	30,97	8,56	B
28	442412208957	264,62	38,04	9,14	30,93	8,56	B
29	342412217119	264,54	38,05	9,18	30,91	8,56	B
30	442412209034	262,95	37,96	9,13	30,76	8,55	C

Fonte: Produção do próprio autor

Cada painel foi montado sobre uma estrutura de alumínio, fabricada com perfis de seção retangular de 5,7 mm x 5,0 mm. Por sua vez, as estruturas individuais dos 30 painéis foram dispostas sobre uma estrutura principal também fabricada em alumínio, de 4 m de largura e 18 m de comprimento. Os perfis retangulares têm uma seção de 25 mm x 50 mm (Figura 40). A configuração foi realizada em filas de 10 painéis conectados em série, para formar três grupos (A, B e C da Tabela 18) que são conectados ao inversor (Figura 41).

Figura 40 - Plataforma metálica para a montagem dos painéis fotovoltaicos.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 41 - Painéis solares alinhados e dispostos em série.



Fonte: Produção do próprio autor

O inversor, da marca Fronius, transforma a energia a corrente contínua produzida nos painéis em energia em corrente alternada, bifásica e com tensão de 208 V (vide Figura 42). Estas características correspondem aos valores da rede interna da Universidade de Ibagué. O inversor

monitora a rede de baixa tensão de forma automática, e suspende imediatamente seu funcionamento quando detecta situações anormais.

Figura 42 - Instalação do inversor na rede experimental



Fonte: Produção do próprio autor

O monitoramento da rede foi realizado sobre os valores de tensão, frequência e outras variáveis. O inversor funciona considerando a potência máxima possível dos painéis fotovoltaicos. Quando a geração não é suficiente para alimentar a rede, o inversor interrompe a conexão entre os componentes eletrônicos de potência e a rede. Se a temperatura do inversor atinge valores elevados, a potência de saída é reduzida como mecanismo de autoproteção.

Os condutores da saída do inversor chegam até uma caixa de conexão localizada no Bloco 3 para a instalação de uma proteção de 40 A. Posteriormente, esta caixa foi conectada à caixa principal do bloco e um medidor de energia marca T260 Itron ACE3000 (conforme a Figura 43).

Figura 43 - Montagem do medidor de energia solar



Fonte: Produção do próprio autor

4.2 OPERAÇÃO DO SISTEMA

A operação do sistema foi acompanhada de forma constante, monitorando a geração de energia elétrica, estado de alertas e alarmes, e os relatórios de qualquer irregularidade no circuito elétrico da Universidade de Ibagué.

Monitoramento do sistema

O monitoramento, parte essencial da operação do sistema, pode ser realizado através de um site na Internet chamado SolarWeb. O site é de propriedade do fabricante do inversor (Fronius) e pode ser acessado através da rede interna Wi-Fi da Universidade de Ibagué. Se o acesso foi realizado fora do campus da universidade, precisa-se iniciar com um login e uma senha, após realizado o cadastro.

Uma vez iniciada a sessão foi possível visualizar na tela as informações da rede Figura 44. Na parte superior, observa-se a potência produzida em kW, a energia gerada durante o dia em kWh e o rendimento atingido em moeda local (peso colombiano ou, em inglês COP, Colombian Peso) durante o dia, mês e o ano. Na parte inferior é exibido o valor das emissões de CO₂ em kg que foram evitadas.

Figura 44 - Monitoramento fornecidas no site da rede Experimental SolarWeb



Fonte: Produção do próprio autor

4.3 MANUTENÇÃO DO SISTEMA

A manutenção foi um ponto importante para garantir o funcionamento adequado da rede experimental. A Tabela 19 apresenta o registro do tempo e das atividades de manutenção a serem executadas na rede experimental.

Tabela 19 - Tempo e atividades de manutenção a serem executadas na rede experimentais.

Equipamento	Atividade	Tempo [meses]
Painéis solares	Limpeza com água pura debaixo teor de cal, temperatura entre 15 - 35°C, escova macia e sabão de pH neutro, limpador de vidro ou bicarbonato de sódio mais água é aceito. Verificação das conexões elétricas.	Cada três meses, de acordo com o nível de sujeira. Verificar conexões elétricas cada seis meses.
Estrutura	Revisão do ajuste dos parafusos e possíveis defeitos no material ou nos perfis.	Cada seis meses ou em caso de acidente.
Inversor	Revisão do ajuste dos parafusos.	Cada ano ou em caso de acidente.
Placa	Revisão do ajuste dos parafusos.	Cada ano ou em caso de acidente.

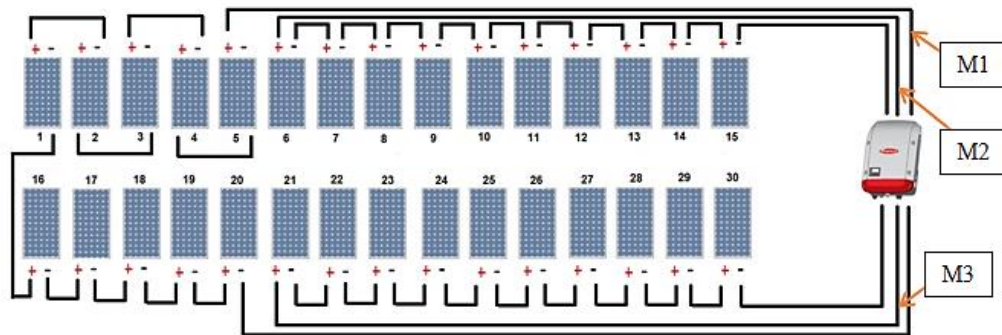
Fonte: Produção do próprio autor

5 ANÁLISE DA REDE EXPERIMENTAL

5.1 METODOLOGIA

A coleta de dados para a caracterização da rede experimental foi realizada durante seis meses em dois pontos de medição do circuito. O primeiro ponto foi ilustrado nas Figuras 45 e 46. Observa-se a configuração e conexão de três arranjos fotovoltaicos de dez painéis cada um, montados sobre o teto do Bloco 3 da Universidade de Ibagué. Os painéis em cada arranjo estão conectados em série, com pontos de medição M1, M2 e M3, respectivamente, onde foi registrado o valor da corrente contínua (CC).

Figura 45 - Representação do circuito elétrico da rede experimental.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 46 - Ponto de medição M1.



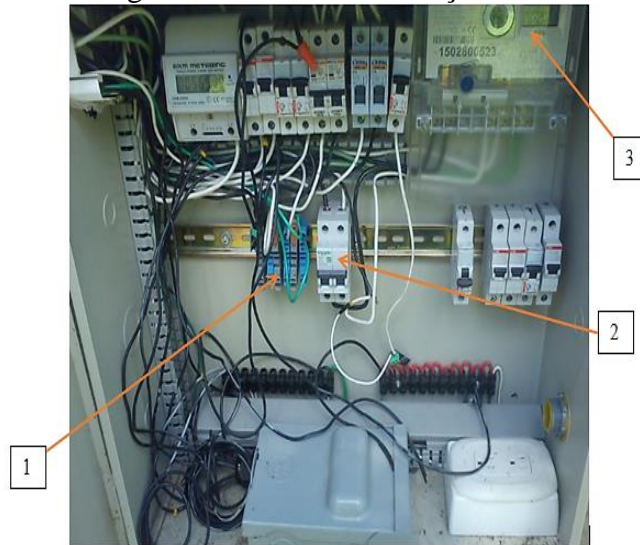
Fonte: Produção do próprio autor.

O ponto de medição N.º1, também inclui registros da temperatura ambiente, velocidade do vento, radiação solar, temperatura superficial do painel, energia total gerada e tensão em corrente

contínua (CC). Os valores em corrente alternada (CA) foram registrados no ponto de conexão número dois Figura 47, cujas partes constituintes são:

1. Terminais, medição de tensão em corrente contínua;
2. Disjuntores, medição de tensão e corrente alternada;
3. Medidor bidirecional, energia total produzida.

Figura 47 - Ponto de medição M2



Fonte: Produção do próprio autor.

O monitoramento foi realizado de segunda a sábado, registrando cinco medições por hora entre as 10h e 16h para um total de 35 medições por dia conforme a Tabela 20.

Tabela 20 - Cronograma de monitoramento semanal.

Hora \Dia	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
10h	x	x	x	x	x	x
11h	x	x	x	x	x	x
12h	x	x	x	x	x	x
13h	x	x	x	x	x	x
14h	x	x	x	x	x	x
15h	x	x	x	x	x	x
16h	x	x	x	x	x	x

Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para coletar os dados de todas as variáveis de interesse em relação à rede experimental, foram utilizados vários instrumentos de medição Figura 48. As características técnicas e as variáveis medidas em cada caso são apresentadas na Tabela 21.

Figura 48 - Aparelhos de medição: (a) Termo-anemômetro digital tipo hélice, (b) alicate amperímetro, (c) medidor de energia solar, (d) pirômetro infravermelho, (e) câmeras de imagem térmica.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 21 - Características técnicas dos instrumentos de medição.

Instrumento	Variável	Faixa	Resolução	Precisão
Termo-anemômetro Erasmus ETAI-30	Velocidade do vento	0,40 – 30,0 m/s	0,01 m/s	$\pm (3\% + 0,2 \text{ m/s})$
Alicate amperímetro Erasmus EPD-1000	Temperatura ambiente	-10 °C – 60 °C	0,1°C	$\pm 2 \text{ °C}$
	Corrente CA/CC	0,01 – 1000 A	0,01 A	$\pm 5\%$
	Tensão CA/CC	0 – 600 V	0,01V	$\pm 5\%$
Medidor de energia solar Erasmus ES-2000	Irradiação	0,0 – 1999 W/m ²	1W/m ²	$\pm 3\%/ano$
Pirômetro infravermelho All - sun 94920	Temperatura do painel	-20 °C – 520 °C	1°C	$\pm 2 \%$
Câmeras de imagem térmica FLIR I15	Temperatura do cabo	-25 °C – 1200 °C	0,10 °C	$\pm 2 \%$

Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Geração de Energia elétrica

A partir das leituras registradas foi possível determinar a eletricidade produzida pela rede experimental, entre os meses de fevereiro e agosto de 2016. Nas Tabelas 22, 23 e 24, apresentamos valores determinados, a partir do monitoramento da rede experimental desde o site Solar Web. Nota-se que a produção de eletricidade foi maior nos meses de março e maio.

Tabela 22 - Produção de eletricidade da rede experimental em kWh/dia na primeira quinzena de cada mês durante o período de estudo.

Dia	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
1	-	22,82	28,49	17,11	21,47	20,1	23,23
2	-	14,96	11,27	26,15	20,61	19,44	23,05
3	-	21,91	31,92	28,78	20,35	16,92	22,58
4	-	22,85	11,00	26,63	21,47	16,85	24,35
5	-	30,25	27,52	28,18	20,59	18,76	24,05
6	-	21,16	18,58	24,46	13,91	19,06	25,52
7	-	27,17	31,52	29,65	17,21	19,49	25,56
8	-	24,43	34,35	22,65	19,89	18,5	24,88
9	-	27,43	14,91	25,82	15,64	19,66	-
10	-	32,07	17,46	18,59	19,23	21,61	-
11	-	27,26	27,33	28,1	18,88	19,7	-
12	-	26,4	10,01	28,23	19,44	19,45	-
13	-	14,4	16,69	23,87	17,48	16,71	-
14	-	18,91	27,02	25,74	20,49	18,07	-
15	-	22,97	25,19	5,57	22,33	19,06	-
Subtotal	0,00	354,99	333,26	359,53	288,99	283,38	193,22

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 23 - Produção de eletricidade da rede experimental em kWh/dia na segunda quinzena de cada mês durante o período de estudo.

Dia	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
16	-	39,52	26,22	24,13	19,01	12,53	-
17	-	14,84	12,04	26,78	22,93	19,58	-
18	-	27,99	27,58	18,33	15,00	19,15	-
19	5,41	29,33	28,57	23,51	17,91	21,24	-
20	21,91	38,75	25,52	25,41	18,92	19,35	-
21	8,98	25,19	31,35	24,74	15,87	17,47	-
22	20,72	23,19	12,97	26,90	18,63	21,3	-
23	33,62	21,28	28,91	24,85	17,26	22,48	-
24	17,11	38,79	14,07	23,47	15,86	18,59	-
25	18,54	35,33	26,40	23,88	18,80	24,37	-
26	17,17	38,39	26,17	10,94	15,85	24,00	-
27	27,68	34,33	27,27	22,61	16,24	23,33	-
28	28,94	35,89	21,37	13,55	20,60	22,75	-
29	34,71	23,04	23,02	20,74	22,33	21,89	-
30	-	26,24	18,25	22,82	19,20	22,56	-
31	-	21,07	-	12,36	-	-	-
Subtotal	234,79	473,17	349,71	345,02	274,41	310,59	0,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 24 - Produção total de eletricidade da rede experimental em kWh/dia durante o período de estudo a partir dos dados das Tabelas 22 e 23.

Dias	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto
1-15	-	354,99	333,26	359,53	288,99	283,38	193,22
16-31	234,79	413,17	349,71	345,02	274,41	310,59	-
Total	234,79	828,16	682,97	704,55	563,40	593,97	193,22

Fonte: Produção do próprio autor.

5.3.2 Medição de variáveis e determinação de indicadores

Como mencionado na seção 5.2 foram coletados dados de radiação solar, velocidade do vento, tensão, corrente, temperatura ambiente e temperatura do painel. Essas informações foram utilizadas no cálculo das eficiências dos três arranjos fotovoltaicos Figura 45 e do inversor. Primeiro, calcula-se a potência de saída em corrente contínua para cada arranjo, como o produto da tensão ($V_{out,CC}$) pela corrente ($I_{out,CC}$), Equação 31.

$$P_{out,CC} = V_{out,CC} \cdot I_{out,CC} \quad (31)$$

Em seguida, considerando a área superficial do painel (A) e a radiação solar incidente (G), calcula-se a potência de entrada ao sistema na Equação 32. Com dez painéis conectados em série para cada arranjo fotovoltaico, tem-se que:

$$P_{in,system} = G \cdot A \quad (32)$$

Finalmente, a eficiência de cada arranjo pode ser calculada com a Equação 33. A seguir, são apresentados os dados das medições realizadas no anexo A, e os cálculos da eficiência dos três arranjos fotovoltaicos e do inversor.

$$\eta_{modulo} = \frac{E_{DC}}{G * A} = \frac{Pot_{out,CC}}{Pot_{in-system}} \quad (33)$$

Para comparar diferentes sistemas fotovoltaicos, o comportamento de cada um deve ser independente das condições ambientais. Por tanto, o programa de sistemas fotovoltaicos de potência da Agência Internacional da Energia estabeleceu os chamados parâmetros

característicos, descritos na Norma IEC 61724. Estes parâmetros foram adotados pela comunidade científica internacional e são geralmente reportados cada mês durante vários anos.

Uma vantagem que oferece este tipo de informação é a possibilidade de identificar falhas no sistema (KHALID et al., 2016). Os três parâmetros mais importantes considerados neste trabalho são mencionados e descritos a seguir (HERNÁNDEZ; GÓMEZ; ROCHA, 2012); os valores calculados são apresentados no Anexo A.

5.3.2.1 Produtividade final (Y_F)

Define-se como a razão entre a energia gerada pelo sistema em um período determinado (E_{FV}) e a potência nominal (P_{nom}) em corrente contínua do gerador fotovoltaico (HERNÁNDEZ; GÓMEZ; ROCHA, 2012; KHALID et al., 2016), Equação 34.

$$Y_F = \frac{E_{FV} \left[\frac{kWh}{kW_p} \right]}{P_{nom} \left[\frac{kWh}{kW_p} \right]} \quad (34)$$

Este parâmetro normaliza a energia gerada e permite comparar sistemas de vários tamanhos e potências, operando em condições ambientais diferentes às condições padrão, ou com diferentes arranjos de painéis fotovoltaicos.

5.3.2.2 Produtividade de referência (Y_R)

Define-se como razão entre a irradiação solar que incide sobre o gerador durante um período determinado (G_{inc}) e a irradiação em condições padrão ($I_{STC} = 1kW/m^2$), Equação 35.

$$Y_R = \frac{G_{inc}}{I_{STC}} [h] \quad (35)$$

A produtividade de referência representa o recurso solar de um sistema fotovoltaico, dependendo da orientação do arranjo de painéis, da época do ano e a variabilidade do clima.

5.3.2.3 Desempenho Global do Sistema (P_R)

Relaciona a energia útil gerada pelo sistema com a energia calculada teoricamente. Este parâmetro é independente do tamanho do sistema fotovoltaico, porém é afetado pelo valor da temperatura ambiente na Equação 36. O rendimento global permite fazer comparações entre vários sistemas em relação à disponibilidade do recurso solar.

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (36)$$

O Rendimento Global é o indicador geralmente utilizado para avaliar o rendimento do sistema conectado à rede; existem alguns exemplos em países como os Estados Unidos, Austrália e alguns na União Européia. Nestes casos foi possível monitorar o comportamento do sistema e alguns aspectos importantes na tomada de decisões a partir da identificação de falhas. No entanto, este parâmetro por si mesmo não representa uma quantidade de energia gerada.

Logo, um sistema com baixo P_R em um lugar de elevada irradiação poderia gerar mais energia do que outro de maior P_R em um lugar com menor irradiação. Isto depende da sensibilidade à temperatura superficial dos painéis, o aproveitamento incompleto da irradiação (efeitos de sombreamento), baixa eficiência ou falha nos componentes do sistema, chuva e a velocidade do vento (HERNÁNDEZ; GÓMEZ; ROCHA, 2012; KHALID et al., 2016).

Os resultados obtidos nas medições das variáveis da rede experimental, pode ser visto no anexo A.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.4.1 Energia Gerada

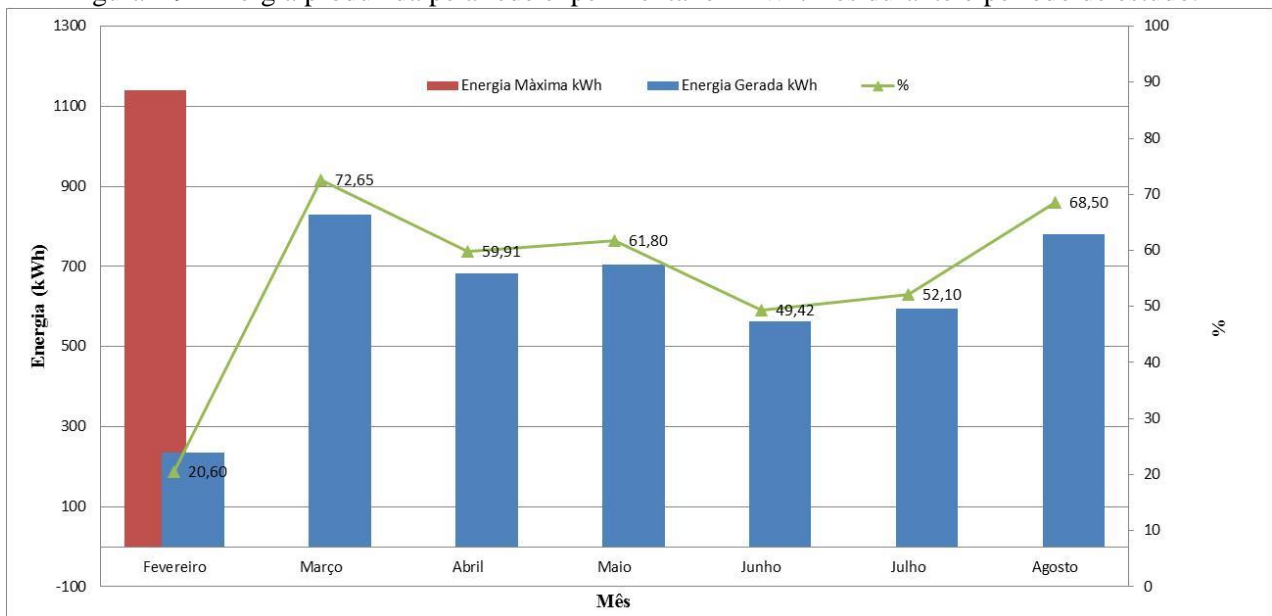
A produção de energia elétrica nos meses de fevereiro e agosto só foi possível em 11 e 12 dias, respectivamente; portanto, estes dados não foram incluídos na análise. A nebulosidade e as chuvas durante vários dias limitaram a potência do sistema, especialmente nos meses de junho e

julho. Junho foi o mês de menor produção com 578,21 kWh/mês, um 49,42% da capacidade instalada (1170 kWh/mês).

Como observado na Figura 49, a energia máxima produzida pela rede experimental foi dada no mês de março atingindo 850 kWh/mês, isto é, um 72,65% do total da capacidade instalada. Outros autores reportam valores similares; por exemplo, 70% (BURGER; RUTHER, 2006; MACEDO; ZILLES, 2007), e a faixa entre 80 e 100% (ISLAM, et al., 2003).

Assim, pode-se concluir que o valor para a rede experimental é próximo dos valores mencionados na literatura. No entanto, isto significa que durante o período de estudo o sistema não conseguiu operar próximo da totalidade da capacidade instalada.

Figura 49- Energia produzida pela rede experimental em kWh/mês durante o período de estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.4.2 Variáveis

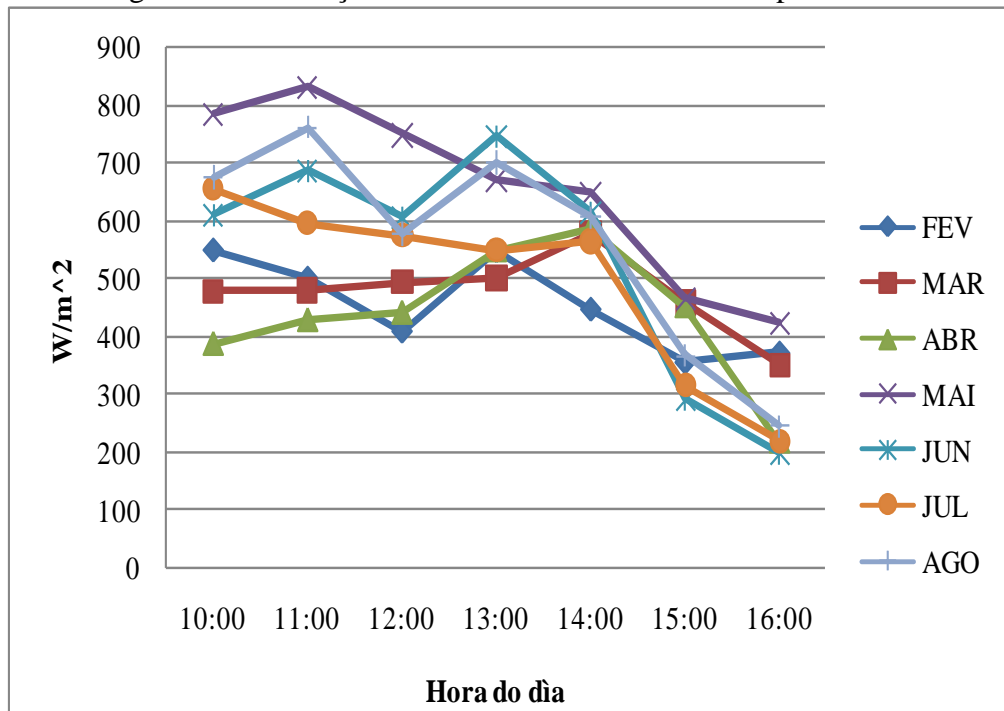
5.4.2.1 Radiação solar

De acordo com a Figura 50, o valor máximo de radiação média foi de 820 W/m² e corresponde ao mês de maio. Em um estudo prévio realizado para a cidade de Ibagué entre 2010 e 2015, o valor da radiação solar foi reportado na faixa entre 950 e 1.020 W/m² (Tabela 7).

Comparando estes resultados incluindo os dados do software Retscreen para o ano 2015 (Tabela 8). Nota-se que os valores são próximos se considerar a alteração climática provocada pela ocorrência do fenômeno El Niño.

A Figura 50, também permite observar de forma geral que a radiação diminui a partir das 14h; logo, o valor mínimo global de 200 W/m^2 foi registrado às 16h no mês de abril. Para a faixa horária entre as 10h e 14h o valor das horas de Sol Pico (HSP) é igual a 5,0; resultado em concordância com o valor utilizado no dimensionamento da rede experimental e aqueles registrados nas Tabelas 7 e 8.

Figura 50 - Radiação solar incidente sobre a rede experimental.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.4.2.2 Temperatura do painel fotovoltaico

Esta variável representa um dos fatores mais importantes que influenciam o comportamento dos painéis fotovoltaicos. Existem vários modelos na literatura para determinar a temperatura do painel em função da irradiação solar, a temperatura ambiente, a velocidade do vento, o material de fabricação do painel, fatores adimensionais e a eficiência de conversão dos componentes do arranjo fotovoltaico (SKOPLAKI; BOUDOUVIS; PALYVOS, 2008).

Devido a que as condições de operação dos painéis nunca são aquelas mencionadas na informação técnica, o uso das equações da Tabela 25, precisa de medições no local. O objetivo foi obter informação atual e confiável para avaliar o comportamento do sistema fotovoltaico em condições reais de operação (LI; CHOW; LEE, 2013; LI; CHEUNG; LAM, 2005; SONG, et al., 2008).

Tabela 25 - Porcentagem de erro no cálculo da temperatura superficial dos painéis para vários modelos matemáticos.

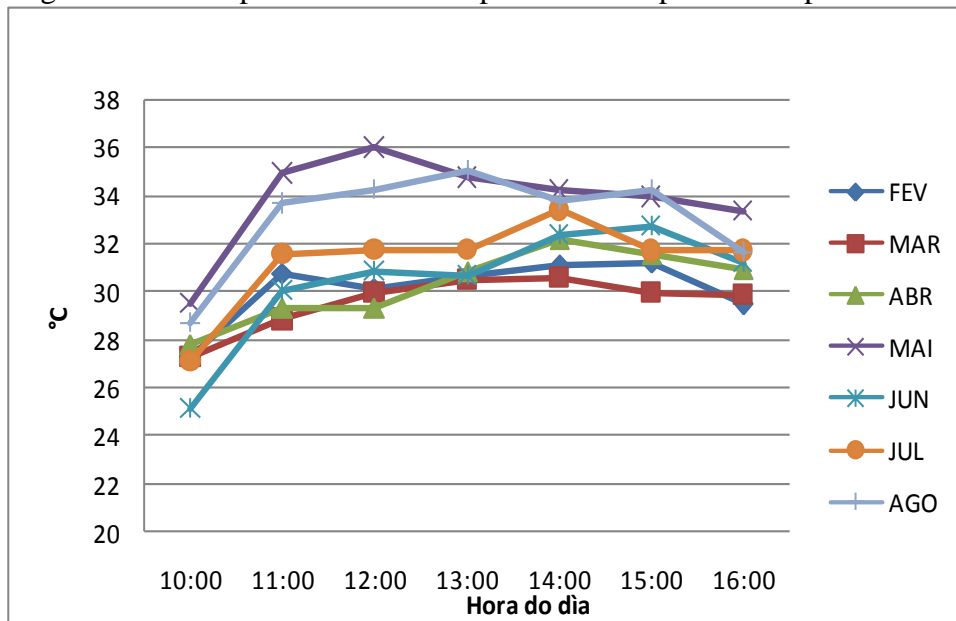
Modelos matemáticos	% Erro	Referência
$T_p = T_{amb} + \alpha G(1 + \beta T_{amb})(1 + \gamma V_{vento})(1 - 1,53\eta_{painel})$	49	SERVANT, 1985
$T_p = T_{amb} + kG$	47	ROSS, 1976
$T_p = 3,12 + 0,025G + 0,899T_{amb} - 1,3V_{vento}$	50	RISSER; FUENTES, 1983
$T_p = T_{amb} + 0,028G - 1$	53	SCHOTT, 1985
$T_p = T_{amb} + 0,035G$	59	ROSS; SMOKLER, 1986
$T_p = T_{amb} + \alpha G(1 + \beta T_{amb})(1 - \gamma V_{vento})$	54	LASNIER; ANG, 1990
$T_p = 30,006 + 0,0175(G - 300) + 1,14(T_{amb} - 25)$	45	SERVANT, 1985
$T_p = T_{amb} + (G/ISTC)[(0,0712V_{vento}^2) - 2,411V_{vento} + 32,96]$	56	KING, 1997
$T_p = T_{amb} + (219 + 832k_t)[(NOCT - 20)/800]$	62	INTERNATIONAL, 2016
$T_p = 0,943T_{amb} + 0,028G - 1,528V_{vento} + 4,3$	54	CHENNI; MAKHLOUF; KERBACHE; BOUZID, 2007
$T_p = T_{amb} + 0,031G$	56	MONDOL; YOHANIS; NORTON, 2007
$T_p = T_{amb} + 0,031G - 0,058$	56	
$T_p = T_{amb} + \omega[0,32/(8,91 + 2V_{vento})]G$	56	SKOPLAKI; BOUDOUVIS; PALLYVOS, 2008

Durante o período de medição a máxima temperatura do painel foi de 44 °C no mês de maio e a mínima de 27 °C no mês de fevereiro Figura 51, os valores são menores em relação ao valor máximo reportado na literatura de 70 °C. O efeito da temperatura foi estudado, encontrando que a potência de saída diminui 0,65% e a eficiência de conversão 0,08% para cada grau de temperatura do painel fotovoltaico concordando com (RADZIEMSKA, 2003; CHANDRASEKAR; SENTHILKUMAR; GANESH, 2013; FENG, et al., 2014).

Como mencionado no primeiro paragrafo, a temperatura de operação depende de vários fatores, incluindo a estrutura de montagem. Nos arranjos fotovoltaicos a temperatura varia significativamente com o vento, em particular, foi observado que para 400 W/m² a temperatura

superficial diminui em média 11 °C com uma velocidade de vento de 1 m/s, 16 °C com 2 m/s e 21 °C com 5 m/s. Geralmente, quando a velocidade do vento não foi levada em consideração, a energia é subutilizada em 3,5%

Figura 51 – Comportamento da temperatura da superfície do painel solar.



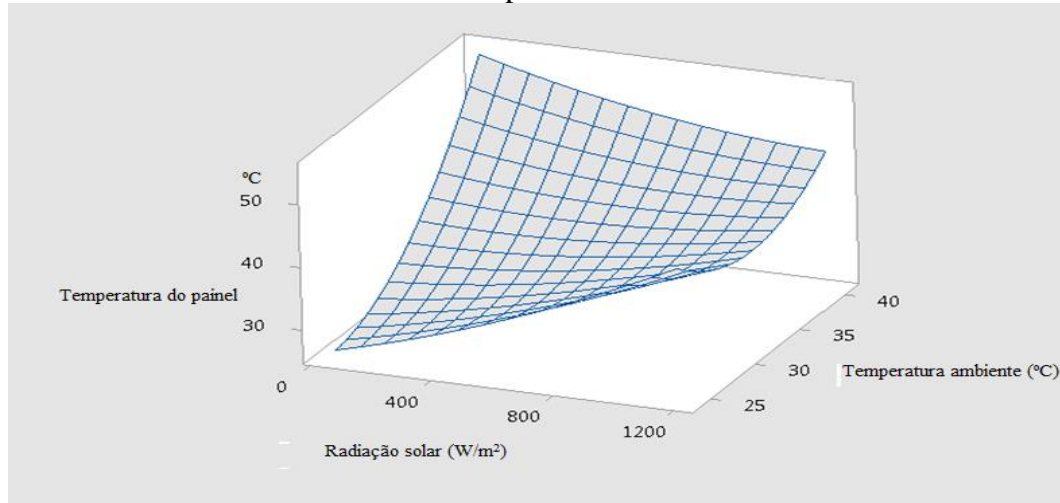
Fonte: Produção do próprio autor.

Como apresentado na Tabela 25, a aplicação dos modelos matemáticos resultou em porcentagens de erro na faixa entre 47 e 62%. Logo, foi preciso desenvolver um novo modelo para relacionar a temperatura superficial do painel com a radiação solar e a temperatura ambiente. Com ajuda do software de estatística Minitab e filtrando os dados para os quais a temperatura do painel é maior do que a temperatura ambiente, a superfície de resposta encontrada foi ilustrada na Figura 52.

Assim, a superfície de resposta proporciona o seguinte modelo matemático válido para a cidade de Ibagué, cuja porcentagem de erro é de 14,09% e com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,761 conforme Equação 37.

$$T_p = 87,9 + 0,05758 G - 5,329T_{amb} + 0,000007 G^2 + 0,1139 T_{amb}^2 - 0,001918GT_{amb} \quad (37)$$

Figura 52 - Superfície de resposta da temperatura superficial do painel em função da radiação solar e da temperatura ambiente.



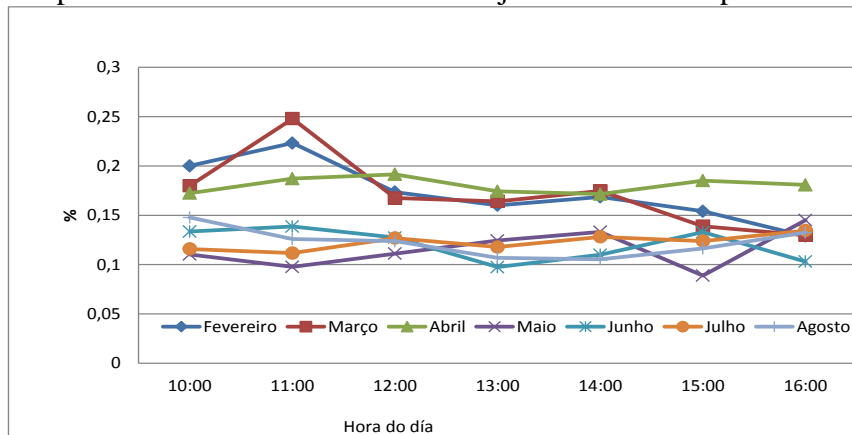
Fonte: Produção do próprio autor.

5.4.3 Cálculo de eficiências e rendimentos

5.4.3.1 Eficiência dos arranjos fotovoltaicos

Durante o período de estudo o comportamento da eficiência foi o esperado, com valores altos nas primeiras horas da manhã e baixos ao final do dia. Os valores médios para a eficiência máxima e mínima foram identificados como 15,2% no mês de março e 11,0% no mês de maio, respectivamente (Figura 53). Estes valores são próximos da eficiência de 15,9% reportada em catálogo e atingida em laboratório sob condições controladas; também da faixa entre 15 e 20% encontrada na literatura (RAHMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2015).

Figura 53 - Comportamento da eficiência dos arranjos fotovoltaicos para cada mês de estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

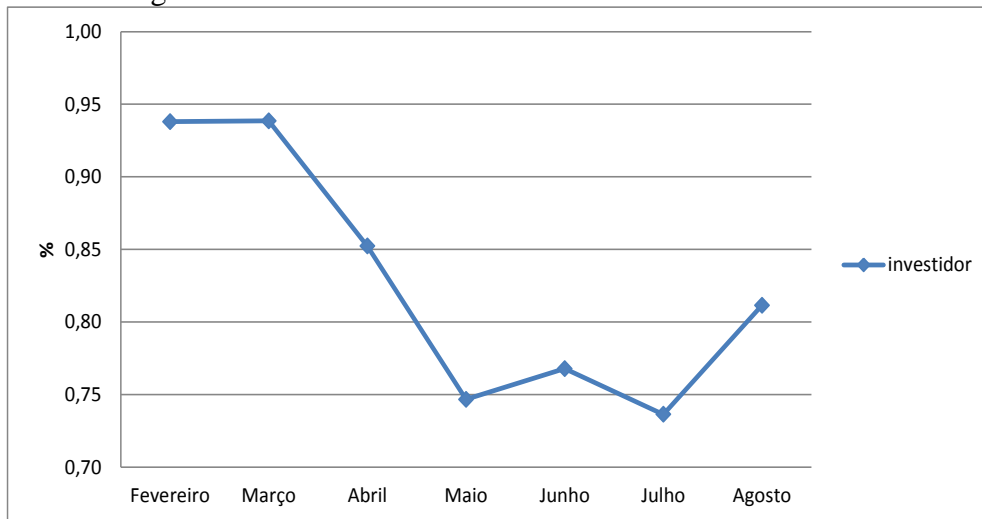
De acordo com a Figura 53, nota-se também que a eficiência dos arranjos diminui com o decorrer do tempo. Assim, a maior eficiência é observada durante os três primeiros meses do estudo, decrescendo devido à presença de sombreamento e sujeira como mencionado na literatura (CELIK, et al., 2013). Este período de três meses coincide com o tempo estimado para a manutenção de todo o sistema fotovoltaico.

A eficiência dos arranjos fotovoltaicos não é afetada na faixa de irradiação entre 400 e 1000 W/m², como observado no anexo 1. Isto é também mencionado por RAHMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM(2015).

5.4.3.2 Eficiência do inversor

No caso do inversor, a eficiência média foi de 75 e 94% para os diferentes valores de irradiação (Figura 54), esta faixa atende o valor de eficiência reportado pelo fabricante dos inversores igual a 96,9%, além disso, os valores são próximos em relação a estudos realizados na Europa e nos Estados Unidos onde a eficiência foi de 88% para inversores Fronius (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2014).

Figura 54 - Eficiência do inversor em cada mês do estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.4.3.3 Produtividade final, Produtividade de referência e Rendimento Global

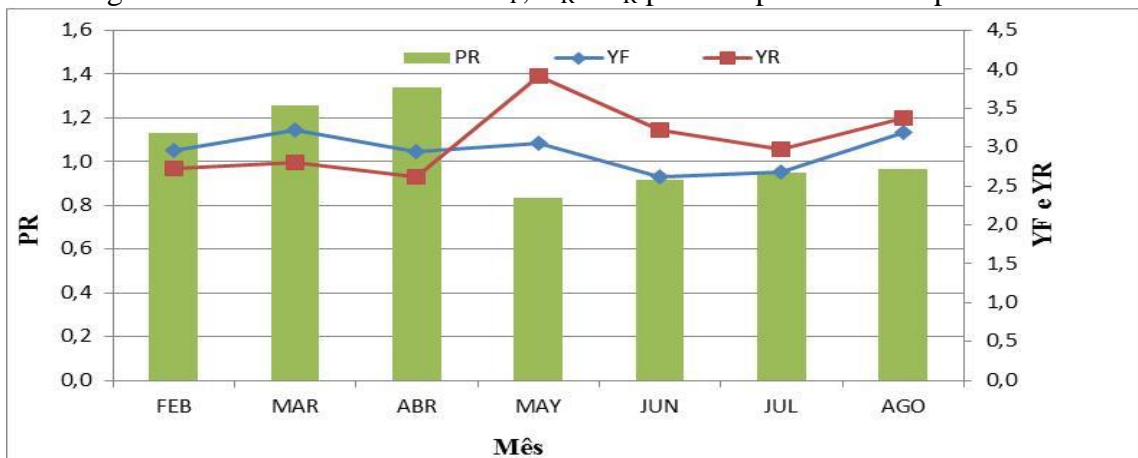
Durante os primeiros três meses de monitoramento o Y_F foi maior ao Y_R , logo o P_R ultrapassou o 100% conforme a equação 36; para os meses restantes a situação foi inversa. O

valor máximo e mínimo do Y_R foi em média igual a 4,0 no mês de maio e de 2,6 no mês de abril, respectivamente (Figura 58). Isto significa que, em geral, o sistema operou com uma radiação solar de 1000 W/m^2 durante 4,0 e 2,6 horas considerando o recurso solar médio.

Por outro lado, os valores de Y_F foram determinados na faixa entre 2,6 e 3,3. Em outras palavras, o sistema teve a capacidade de produzir 3,3 vezes o valor da sua capacidade instalada, como se a rede experimental tivesse operado entre 2,6 e 3,3 horas durante o dia do monitoramento.

No caso do P_R os valores médios determinados por mês estiveram na faixa entre 0,83 e 1,30. Estes valores sugerem um bom rendimento do sistema de acordo com o EU Performance Project e superando as exigências da European PV Guidelines, onde recomenda-se a faixa de P_R entre 0,8 e 0,85. Os resultados também são próximos em relação a outros estudos (KHALID, et al., 2016; VENTURA; TINA, 2016; KURTZ; BECERRA; RILEY, 2013).

Figura 55 - Valores médios do Y_F , Y_R e P_R por mês para a rede experimental



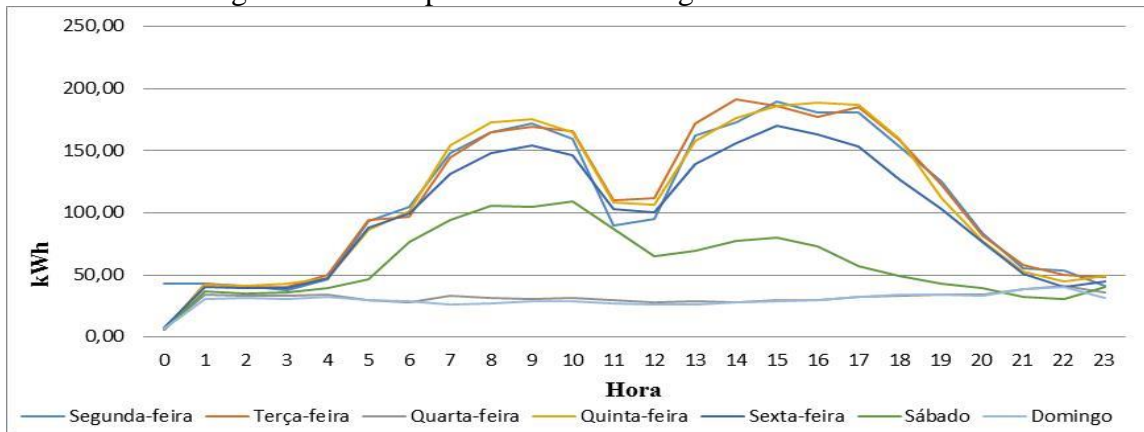
Fonte: Produção do próprio autor.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA NO PONTO COMUM DE CONEXÃO À REDE.

Ao comparar os resultados obtidos das medições de energia ativa por dia no ponto comum de conexão à rede, antes na Figura 1 e depois na Figura 56, da montagem do SFCR, pode-se observar que não existem diferenças acentuadas. Durante o período acadêmico o consumo

registra um máximo de 190 kWh/dia, entretanto, foi de 30 kWh/dia na ausência dos alunos. No domingo o consumo não é alterado pelas atividades acadêmicas entre as 10h e 15h, período de funcionamento da rede experimental, porém foi identificada uma diminuição média de 8 kWh/dia. Uma análise semelhante entre as 10h e 12h indica uma diminuição de 10 kWh/dia. Portanto, demonstra-se que a rede experimental atende ao consumo de energia ativa da Universidade de Ibagué, sendo visível nos períodos de consumo estável.

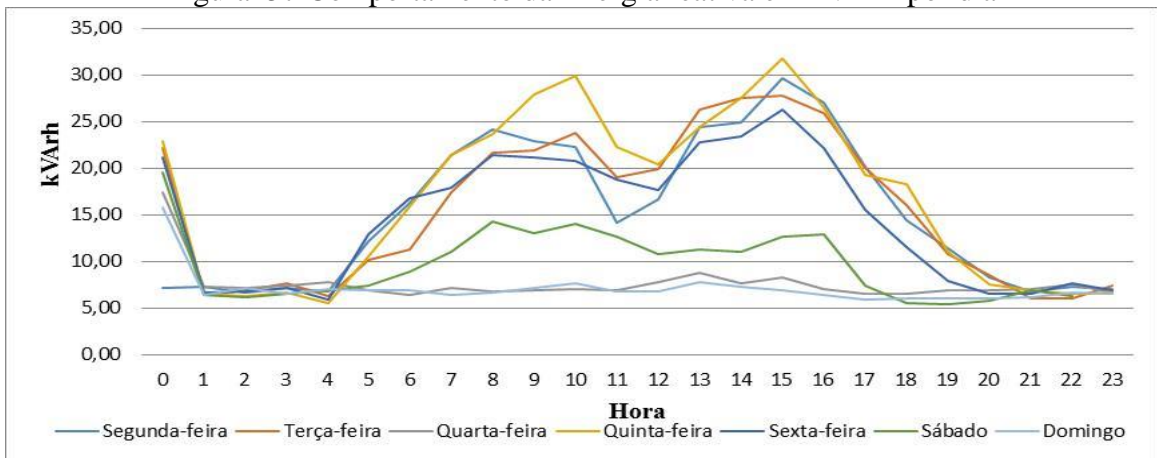
Figura 56 - Comportamento da Energia ativa em kWh/dia



Fonte: Produção do próprio autor.

Pelo contrário, o consumo de Potência reativa aumentou um 7% em relação ao valor máximo observado antes Figura 2 e depois Figura 57 da montagem do SFCR; e um 40% se comparar com o valor mínimo.

Figura 57 Comportamento da Energia reativa em kVArh por dia



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.1 Perturbações de longa duração ou permanentes

5.5.1.1 Variação da tensão de estado estacionário

A conexão da rede experimental não apresentam impactos negativos na variação da tensão das linhas, em conformidade com o estabelecido pelas normas NTC 5001, IEC 038 e EM 50160. Esta afirmação encontra fundamento logo de analisar as informações sobre a qualidade da energia na Universidade de Ibagué Figuras 5, 6 e 7, em relação à variação de tensão de estado estacionário, antes e depois da operacionalização do SFCR Figuras 58, 59 e 60, e Tabela 26.

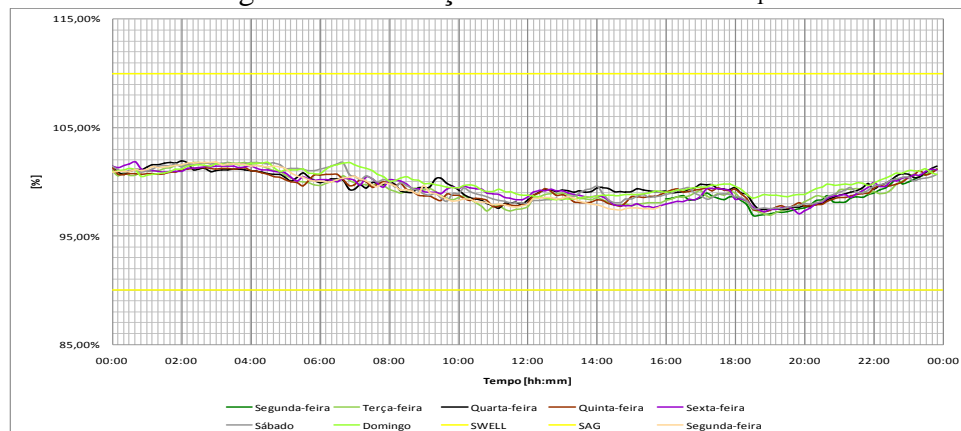
Adicionalmente, não foram registradas sobretensões nem sobtensões durante as medições. Contudo, um incremento máximo de tensão de 2% foi identificado em relação ao valor mínimo, conforme o referido por STETZ; YAN; e BRAUN (2010); STETZ, MARTEN, e BRAUN (2013). Nestes estudos mencionam-se que a rede experimental pode gerar um incremento da tensão do sistema, sendo crítico quando ela se aproxima à tensão máxima permitida pela norma.

Tabela 26 - Comparação da variação da tensão de estado estacionário

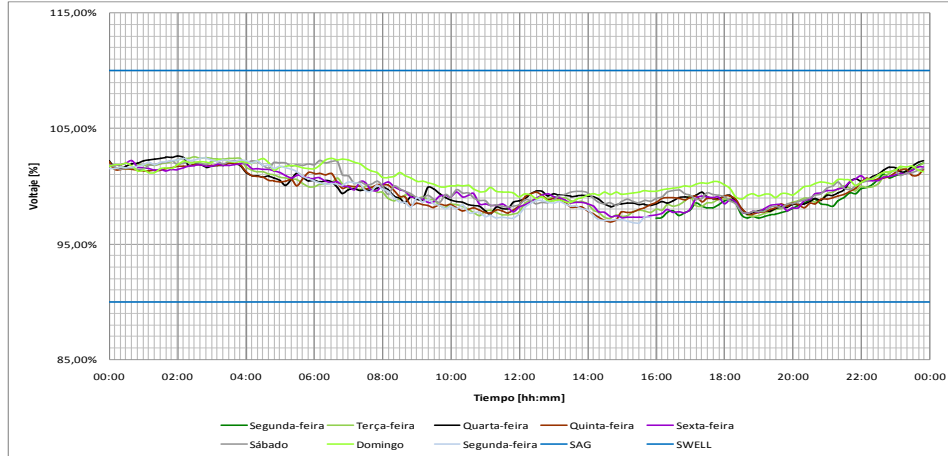
Tensão	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U ₁	102,61%	95,90%	101,67%	97,38%	110%	90%
U ₂	102,87 %	96,19%	102,61%	97,05%	110%	90%
U ₃	100,58%	94,08%	100,02%	96,09%	110%	90%

Fonte: Produção do próprio autor.

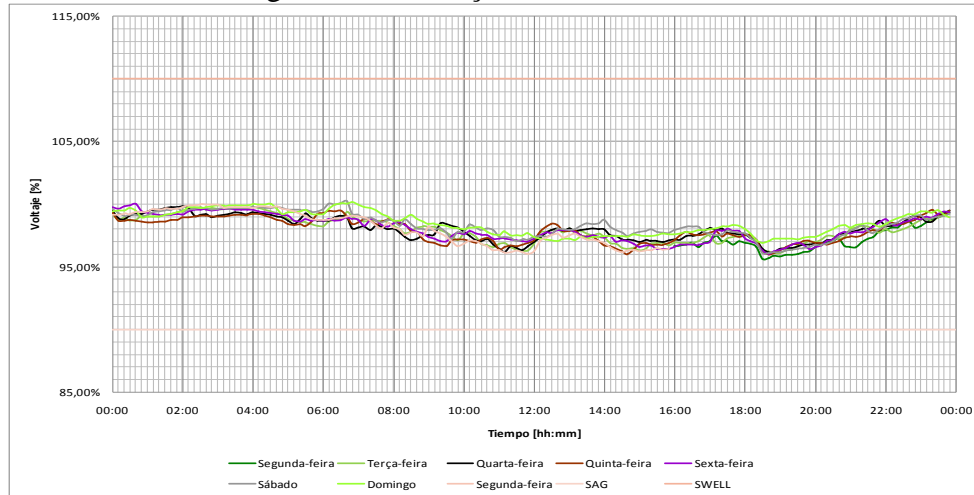
Figura 58 - Variação da tensão da linha U₁.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 59 - Variação de tensão linha U₂.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 60 - Variação de tensão linha U₃

Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.1.2 Desequilíbrio de tensão

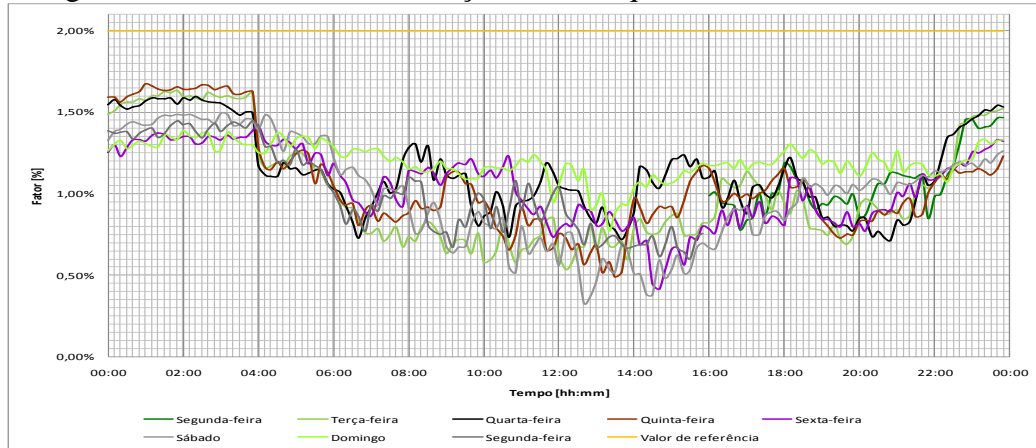
Depois da operacionalização do SFCR o desequilíbrio de tensão continuou dentro dos limites estabelecidos pela norma NTC 5001. No entanto, ao comparar os resultados iniciais Figura 8 com aqueles obtidos depois da conexão do SFCR (Figura 61 e Tabela 27), notam-se que o sistema diminuiu o desequilíbrio de tensão em 3,5% e 70% em relação ao valor máximo e mínimo, respectivamente. Embora alguns autores (VON; BANERJEE, 2001) mencionam que o desequilíbrio de tensão pode aumentar com a operacionalização do SFCR, mas este não foi o caso.

Tabela 27 - Comparação do desequilíbrio de tensão

Variável	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Desequilíbrio de tensão	1,72%	1,10%	1,66	0,33	2,00%	2,00%

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 61 - Resultados das medições do desequilíbrio de tensão no circuito.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.1.3 Cintilações

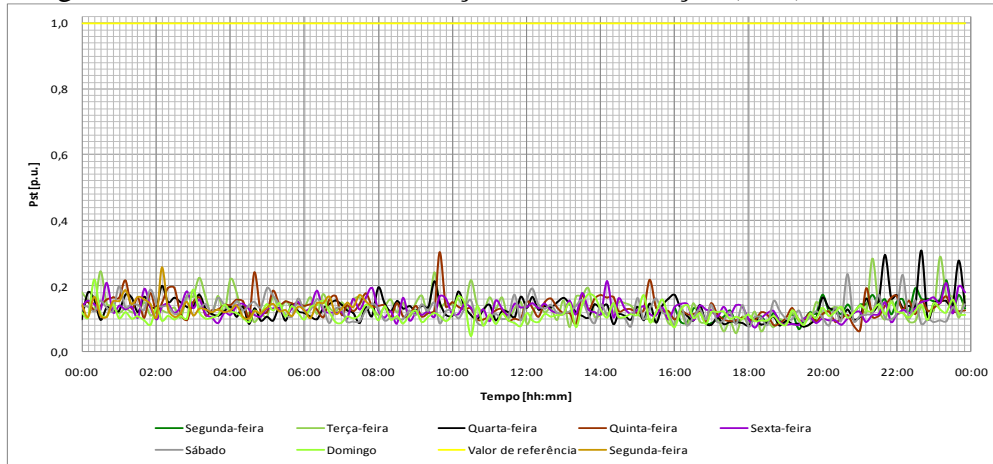
As medições das cintilações de curta duração, antes e depois da operacionalização do SFCR, permitiu identificar que os valores registrados estão por dentro dos requerimentos ditados pelas normas NTC 5001 e EM 50160. Isto pode ser observado nas Figuras 9 – 11 e nas Figuras 62 – 64. A Tabela 28 apresenta o valor máximo de 0,35 e o mínimo de 0,10 p.u. Todos os valores registrados são menores ao valor máximo permitido de 1,0 p.u. e similares entre as linhas, como é mencionado por JIANHUI, ET al., (2014) para um sistema fotovoltaico de 7,2 kWp conectado à rede elétrica com 0,38 p.u.

Tabela 28 - Comparação da cintilação de curta duração (PST).

Linha	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U ₁	0,30 p.u	0,10 p.u	0,30 p.u	0,10 p.u	1,00 p.u	1,00 p.u
U ₂	0,32 p.u	0,10 p.u	0,35 p.u	0,15 p.u	1,00 p.u	1,00 p.u
U ₃	0,27 p.u	0,10 p.u	0,25 p.u	0,10 p.u	1,00 p.u	1,00 p.u

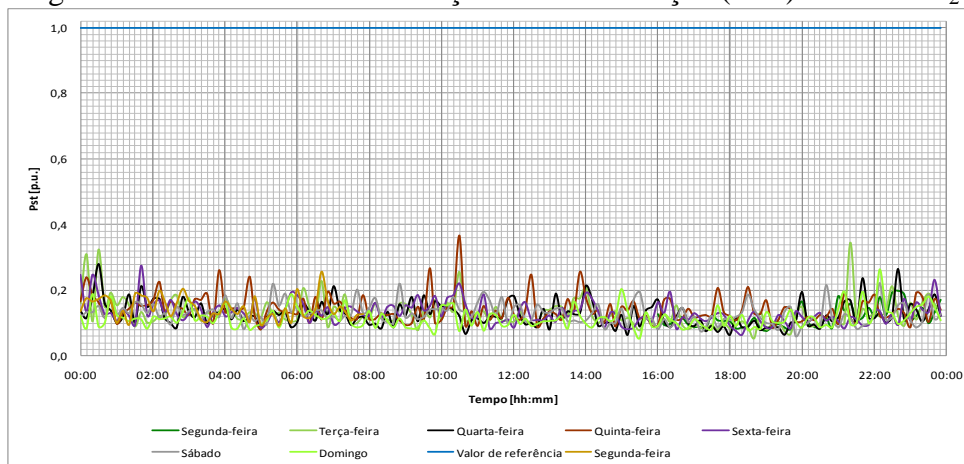
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 62 - Severidade da cintilação de curta duração (PST) na Linha U₁.



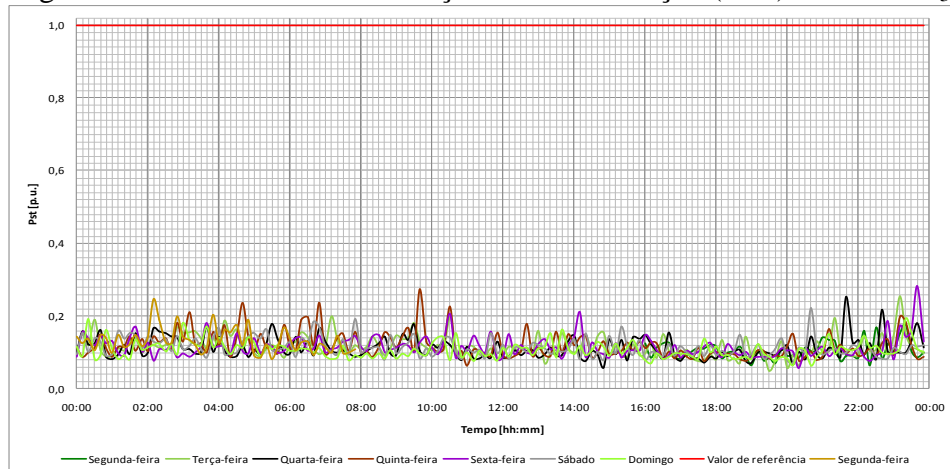
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 63 - Severidade da cintilação de curta duração (PST) na Linha U₂



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 64 - Severidade da cintilação de curta duração (PST) na Linha U₃



Fonte: Produção do próprio autor.

A mesma situação ocorreu com a cintilação de longa duração (PLT), pois não foram identificadas diferenças significativas antes e depois da potencialização do SFCR. O valor máximo foi de 0,20 e o mínimo de 0,09 p.u, inferiores ao valor máximo permitido de 0,65 p.u, pela norma NTC 5001 Tabela 29.

Da mesma forma que para as cintilações de curta duração, as medições da cintilação de longa duração mostram-se inferiores ao reportado por JIANHUI;YUN;JUN e EZRA (2014) para o sistema fotovoltaico de 7,2 kWp. Neste caso, o valor obtido foi de 0,36 p.u.

Tabela 29 - Comparação da cintilação de longa duração (PLT).

Linha	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U ₁	0,19 p.u	0,09 p.u	0,19 p.u	0,09 p.u	0,65 p.u	0,65 p.u
U ₂	0,19 p.u	0,10 p.u	0,20 p.u	0,10 p.u	0,65 p.u	0,65 p.u
U ₃	0,20 p.u	0,10 p.u	0,20 p.u	0,09 p.u	0,65 p.u	0,65 p.u

Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.1.4 Interrupções de longa duração

De acordo com os dados apresentados e considerando os requerimentos da Norma NTC 5001, pode-se mencionar que não houve interrupções de longa duração durante as medições realizadas, antes e depois da instalação do SFCR.

5.5.1.5 Harmônicos de tensão

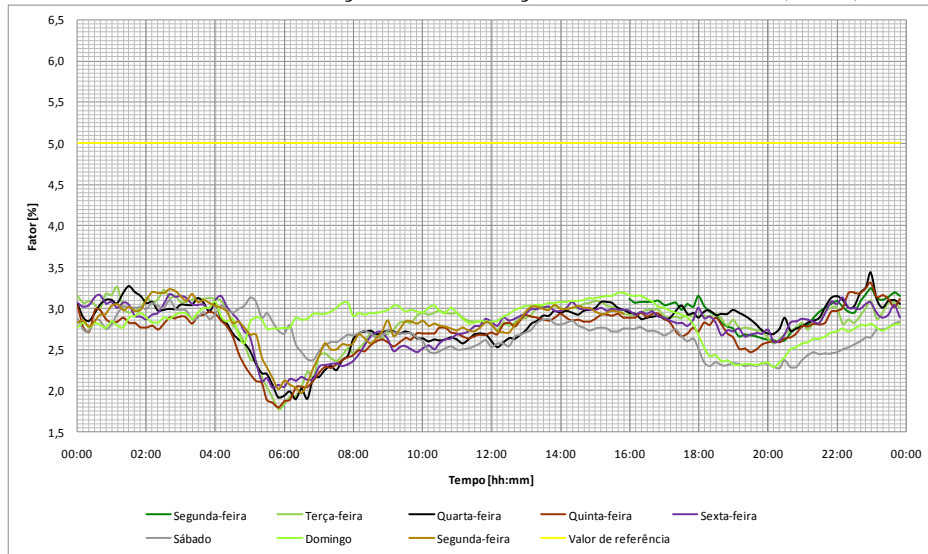
Os valores dos harmônicos de tensão (THD) que foram registrados prévia e posteriormente à operação do SFCR são inferiores ao 5,0% estabelecido pela Norma NTC 5001, sendo que o valor máximo na Linha U₂ atinge 3,75%. No entanto, em todas as linhas é possível identificar um incremento, isto é, 7% na linha U₁, 0,8% na linha U₂ e 3% na linha U₃ Tabela 30.

De acordo com a literatura (LOPEZ, et al.,2007), estes incrementos observados nas Figuras 15 – 17 e nas Figuras 65 – 67 ocorrem pelas correntes de fuga que aumentam as emissões eletromagnéticas e os harmônicos na estrutura elétrica existente. Outra referência também reporta um incremento entre 0,7 – 2,5% em um sistema de 8 kWp (ELKHOLY et al., 2016).

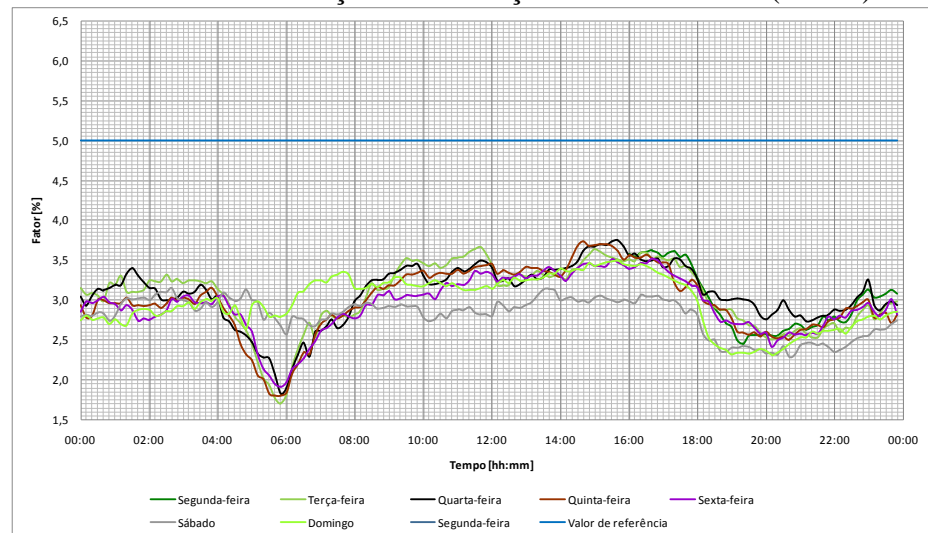
Tabela 30 - Comparação da distorção harmônica total de tensão (THD).

Linha	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U ₁	3,18 %	2,21 %	3,40 %	1,70 %	5,00 %	5,00 %
U ₂	3,72 %	2,13 %	3,75 %	1,80 %	5,00 %	5,00 %
U ₃	3,42 %	2,40 %	5,52 %	1,80 %	5,00 %	5,00 %

Fonte: Produção do próprio autor.

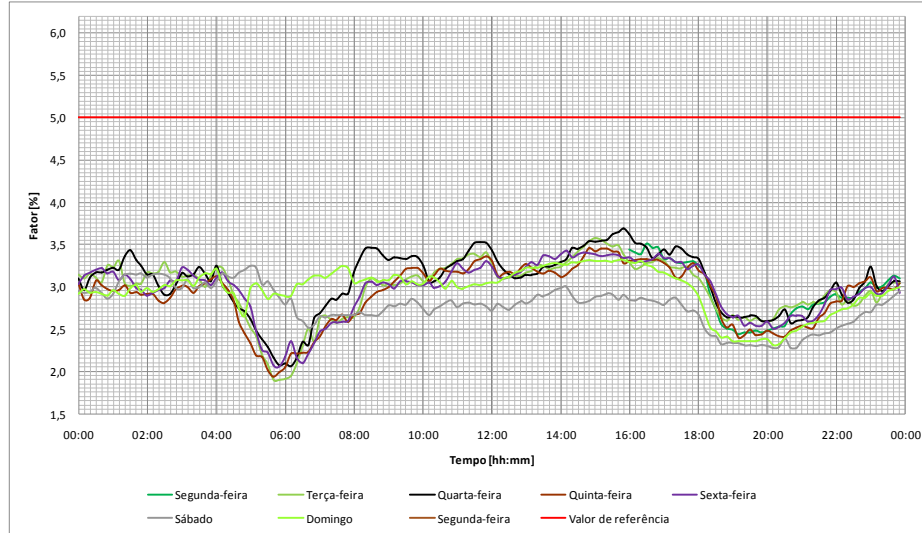
Figura 65 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THD) na linha U₁.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 66 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THD_v) na linha U₂.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 67 - Resultados das medições de distorção harmônica total (THD_v) na linha U₃.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.1.6 Harmônicas de corrente

Neste caso, as medições das harmônicas de corrente permitem identificar que os valores estão por fora do limite estabelecido pela Norma NTC 5001 Tabela 31, para todas as linhas, também, antes e depois da instalação do SFCR. O valor máximo de 17,8 TDDI representa um excesso de 356%. Os valores entre as linhas U₁ e U₂ não apresentam diferenças significativas Figuras 19 – 21 e Figuras 68 – 70.

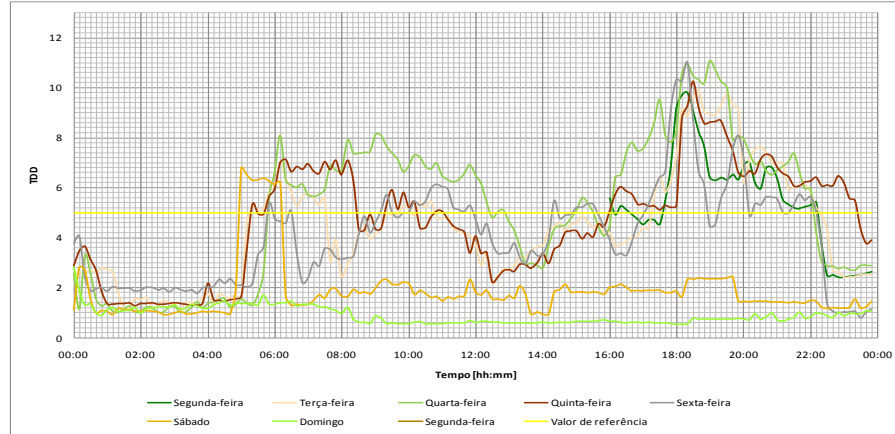
A linha U₁ registra um incremento de 22% em relação às medições prévias, similar ao reportado por ELKHOLY et al., 2016, onde menciona-se um incremento entre 2 e 38% em um sistema de 8 kWp. Adicionalmente, e com o conceito de COBBENS; KLING e MYRZIK (2007) reportam a existência de tais incrementos.

Tabela 31 - Comparação da distorção harmônica total (TDDI).

Linha	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U ₁	9,00	0,80	11,00	0,80	5,00	5,00
U ₂	17,00	3,00	17,80	2,50	5,00	5,00
U ₃	16,80	3,00	16,50	2,00	5,00	5,00

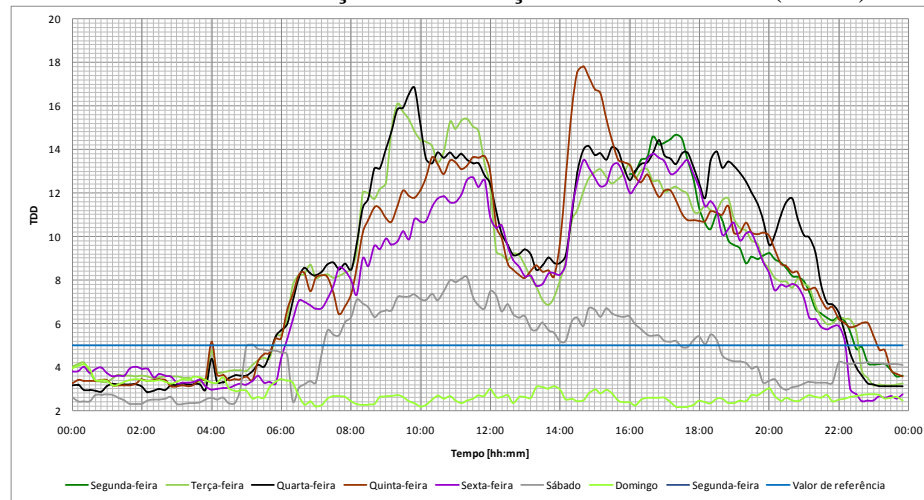
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 68 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDDI) na linha U₁



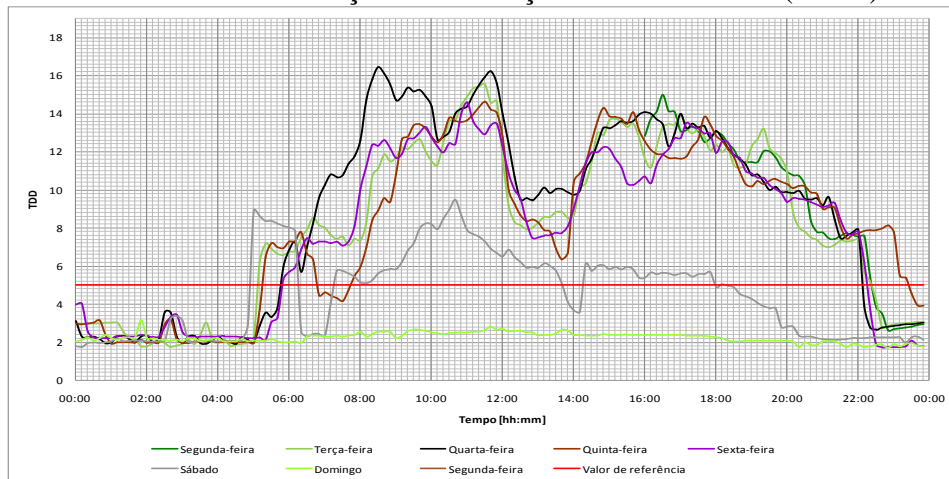
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 69 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDDI) na linha U₂.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 70 - Resultados das medições de distorção harmônica total (TDDI) na linha U₃.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.1.7 Entalhes de tensão

De acordo com os dados de entalhes de tensão (Notches) apresentados nas Figuras 5 – 7 e nas Figuras 58 – 60, não houve mudanças em relação aos valores antes e depois da instalação do SFCR.

5.5.2 Perturbações lentas

Nesta seção, os conceitos e comentários são referidos às Figuras 5 – 7 e as Figuras 58 – 60 deste trabalho.

5.5.2.1 Interrupções de curta duração

Conforme as figuras mencionadas no começo desta seção (5.5.2), não se apresentaram mudanças no sistema devido a interrupções de curta duração.

5.5.2.2 Afundamentos de tensão

No caso dos afundamentos de tensão (SAGS), as figuras mencionadas permitem observar que todos os valores superam o 90% da tensão nominal de operação do sistema; portanto, não foram detectados valores de afundamentos de tensão antes ou depois da operacionalização do SFCR.

5.5.2.3 Elevações de tensão

Todos os valores das elevações de tensão (SWELLS) reportados em cada linha são menores de 110% da tensão nominal de operação. Desta forma, cumpre-se com os requerimentos estabelecidos pela norma NTC 5001.

5.5.2.4 Variações de frequência

As medições de frequência, antes e depois da operacionalização do SFCR Figura 22 e 71, não indicam mudanças significativas; portanto, o sistema cumpre novamente com a Norma NTC 5001, como apresentado na Tabela 32. Isto também acontece com a norma IEEE 1547, que

considera um desvio padrão máximo na frequência de 0,1 Hz e foi também referenciado por BHATT; CHOWDHURY (2011).

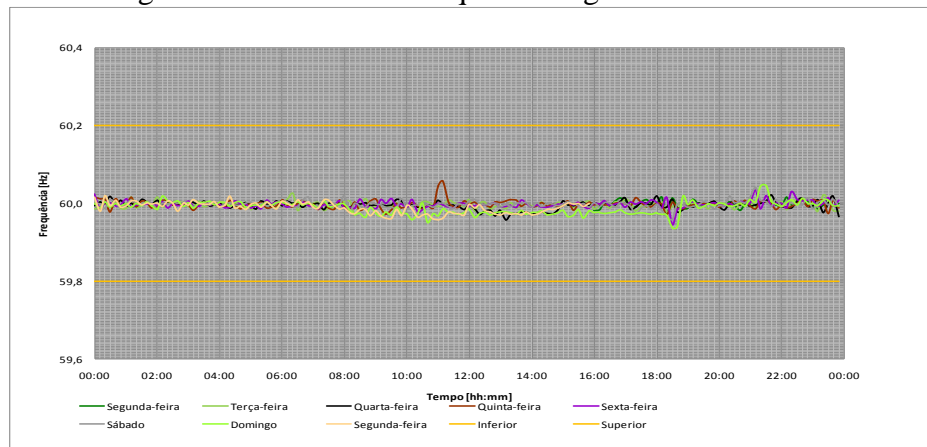
A geração total pelo SFCR nunca foi superior à demanda, logo não houve variação na frequência que pudesse destruir o sistema mecânico das máquinas rotativas conectadas ou colocar em risco a estabilidade do sistema, como mencionado por HIRTH; ZIEGENHAGEN (2015).

Tabela 32- Comparação dos Valores da frequência.

Variável	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Frequência	60,05 Hz	59,98 Hz	60,05 Hz	59,98 Hz	60,20 Hz	59,80 Hz

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 71 - Valores da frequência registrada no circuito.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.3 Perturbações Rápidas

5.5.3.1 Sobretensões transitórias

Durante o período de medições não foram identificadas sobretensões de este tipo, antes ou depois da utilização do SFCR, conforme as Figuras 5 – 7 e as Figuras 58 – 60.

5.5.3.2 Potência ativa, reativa e aparente.

Os dados da potência ativa são apresentados nas Figuras 25 – 27 e nas Figuras 72 – 74, antes e depois da potencialização do sistema, respectivamente. Observou-se um incremento de

66% na linha U_1 , 45% na linha U_2 e 37% na linha U_3 , segundo a Tabela 33. Isto se deveu à disponibilidade da potência na SFCR. Após analisar o comportamento da potência ativa durante o dia domingo, não foi registrado consumo para as linhas U_2 e U_3 , sendo 100% menor em relação aos valores anteriores; a linha U_1 permaneceu constante.

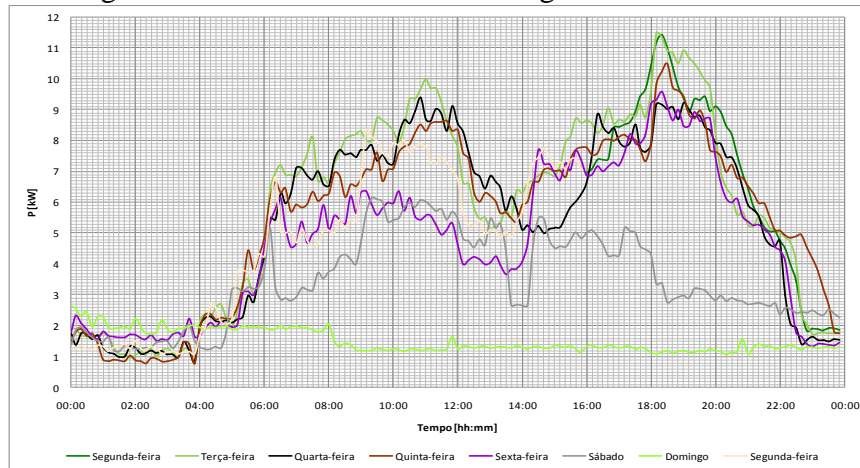
Tabela 33 - Comparação dos valores de Energia ativa em kW.

Linha	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U_1	6,80	1,00	11,30	1,00	NA	NA
U_2	7,80	1,00	11,30	1,00	NA	NA
U_3	9,00	1,00	12,30	1,00	NA	NA

Fonte: Produção do próprio autor.

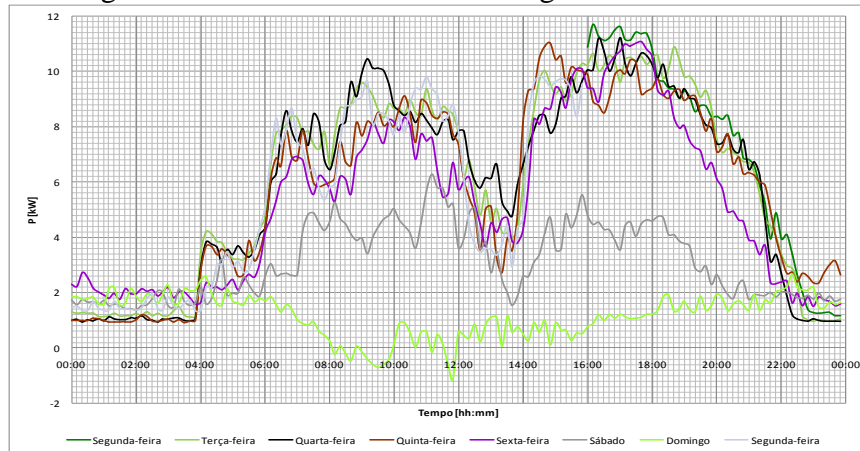
NA: No Aplica

Figura 72 - Valores médios da Energia ativa na linha U_1 .

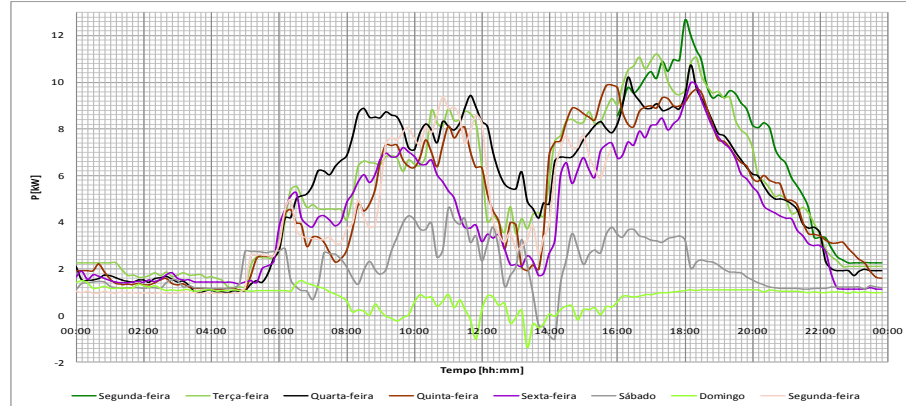


Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 73 - Valores médios da Energia ativa na linha U_2 .



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 74 - Valores médios da Energia ativa na linha U₃.

Fonte: Produção do próprio autor.

A potência ativa total foi aumentada em 58% devido à operação do SFCR Tabela 34, Figuras 29 e 75; este resultado é coerente com o aumento produzido em cada linha. Contudo, durante as horas de operação da rede experimental no domingo não foram registrados dados da potência ativa total, já que a rede experimental gerou toda a energia para suprir a demanda.

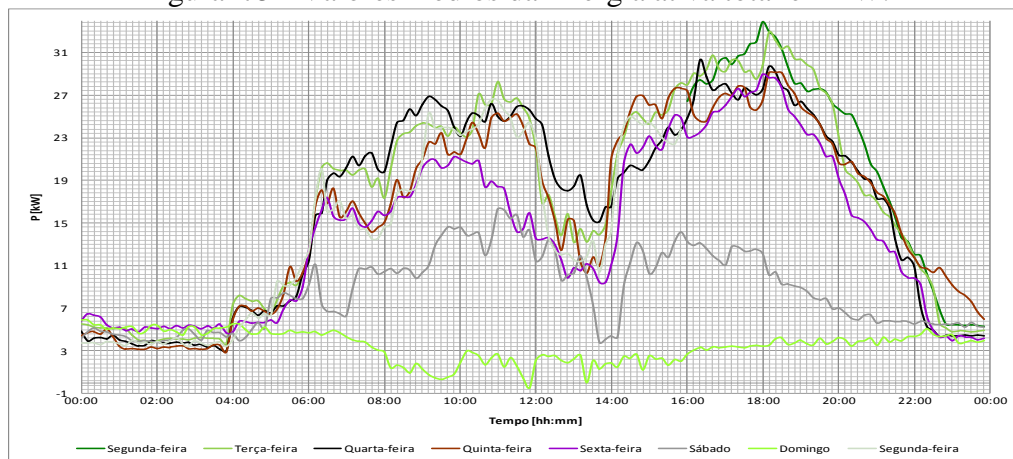
Tabela 34 - Comparação dos valores da Energia ativa total em kWh.

Variável	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Energia Ativa Total	21,50	4,00	33,88	3,00	N.A	N.A

Fonte: Produção do próprio autor.

NA: No Aplica

Figura 75 - Valores médios da Energia ativa total em kW.



Fonte: Produção do próprio autor.

Por outro lado, a potência reativa teve um incremento de 17% nas linhas U₁ e U₃. Na linha U₂, o incremento foi de 62,5%, Tabela 35 em relação aos valores medidos inicialmente e

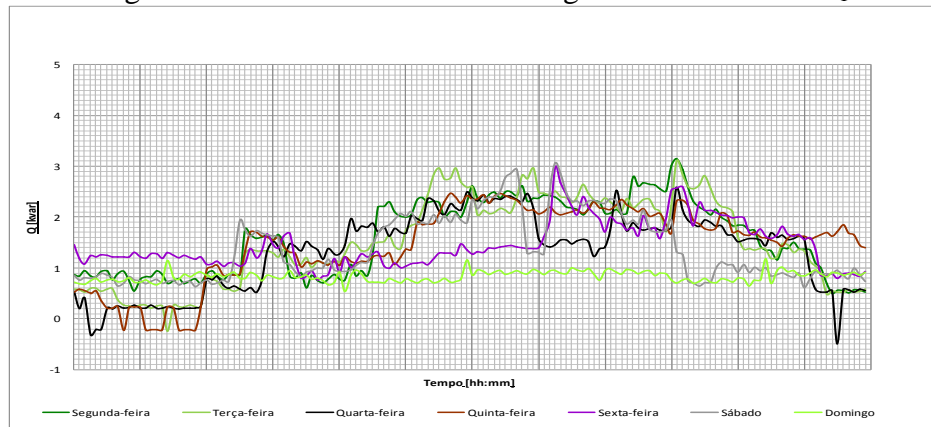
apresentados nas Figuras 26 – 28 e nas Figuras 76 – 78. De acordo com a Norma IEEE 1547 Seção 3.1, o dimensionamento do inversor deve considerar uma operação cujo fator de potência esteja próximo de 1,0; assim, minimiza-se a potência reativa entregada à rede. Isto corrobora o mencionado na norma IEEE e em referências na literatura como SMITH; SUNDERMAN; DUGAN e SEAL (2011).

Tabela 35 - Comparação dos valores da Energia reativa em kVAr.

Línea	Antes		Después		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
U ₁	2,50	1,00	3,00	1,00	NA	NA
U ₂	1,50	0,80	4,00	1,00	NA	NA
U ₃	-0,50	-2,50	-0,50	-3,00	NA	NA

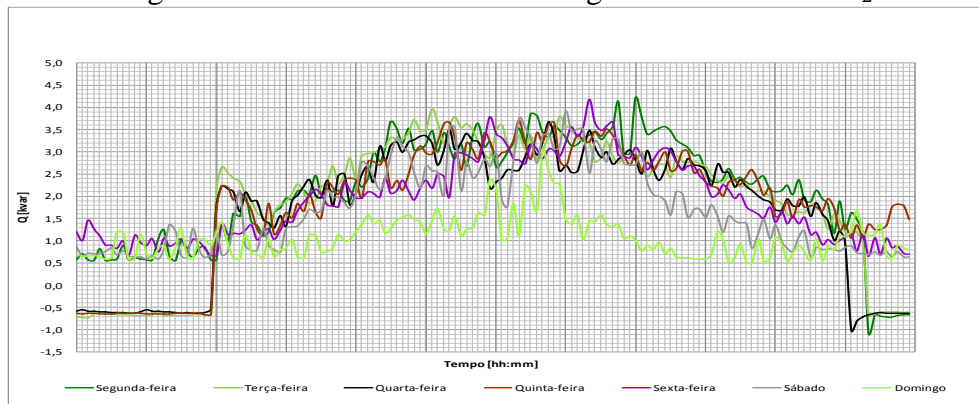
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 76 - Valores médios da Energia reativa na linha U₁.

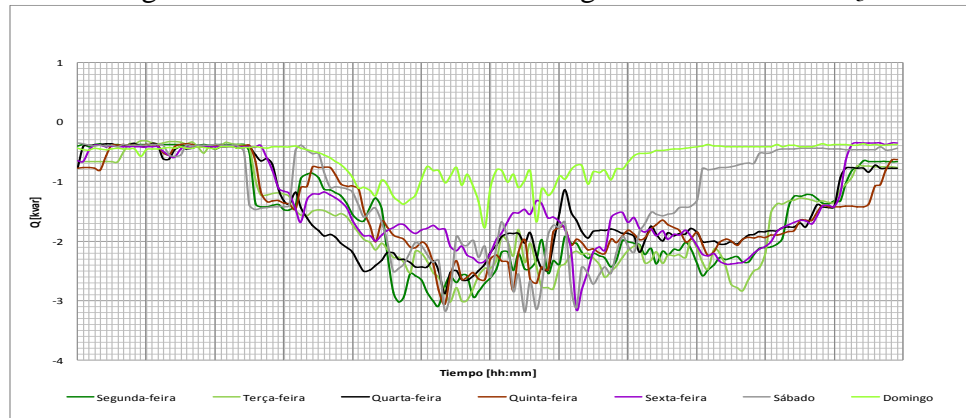


Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 77 - Valores médios da Energia reativa na linha U₂.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 78 - Valores médios da Energia reativa na linha U₃.

Fonte: Produção do próprio autor.

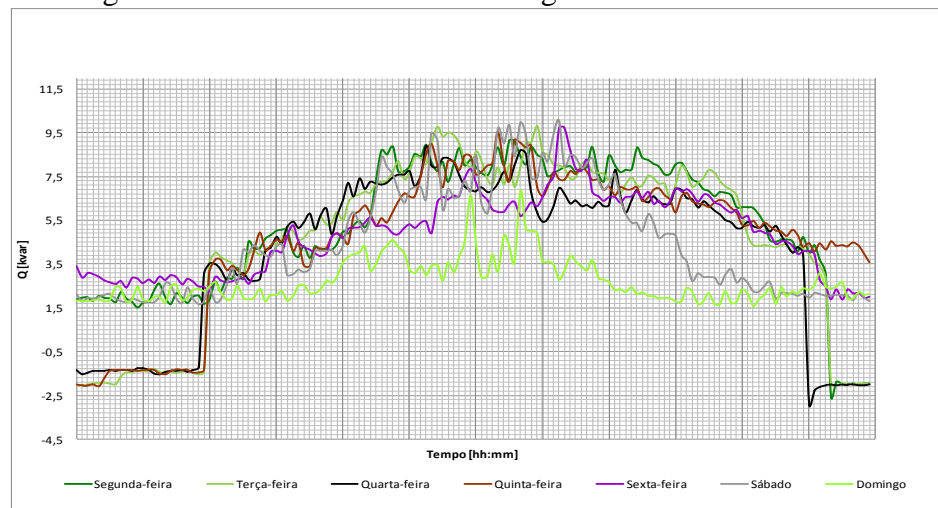
Como observado na Tabela 36, a potência reativa total teve um aumento de 42% em relação às medições prévias Figura 29 e 79. O maior aumento ocorreu no horário de operação da rede experimental.

Tabela 36 - Comparação dos valores da Energia reativa total em kVAr.

Variável	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Energia reativa Total	5,50	1,50	9,50	1,50	N.A	N.A

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 79 - Valores médios da Energia reativa total em KVAR.



Fonte: Produção do próprio autor.

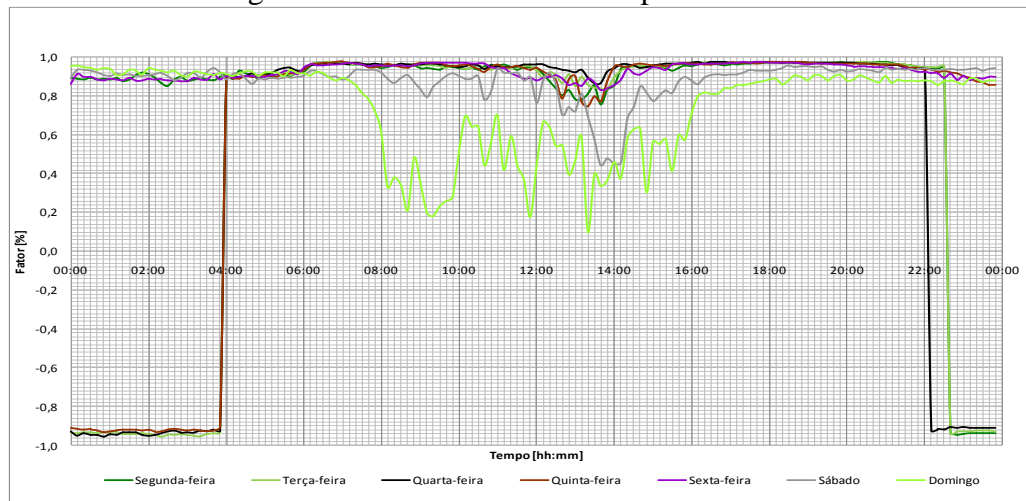
O fator de potência não foi afetado com a presença da rede experimental Figuras 30 e 79. Os valores estão por dentro dos requerimentos da Norma NTC 5001 Tabela 37, sendo 0,98 o

valor máximo e 0,90 o mínimo. Estes valores são coerentes com os regulamentos de utilidade, os quais sugerem que os sistemas fotovoltaicos devem operar com fator de potência superior a 0,85, seja capacitivo ou indutivo, se o registro na saída é maior de 10% da capacidade (DREWST, et al., 2008; BALCELLS et al., 2004; BOUCHAKOUR et al., 2012).

Tabela 37 - Comparação dos valores do Fator de potência.

Variável	Antes		Depois		Norma	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Fator de Potência	0,98	0,85	0,98	0,90	1,00	0,90

Figura 80 - Valores do Fator de potência total.



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5.4 Análise termográfica no ponto comum de conexão (PCC)

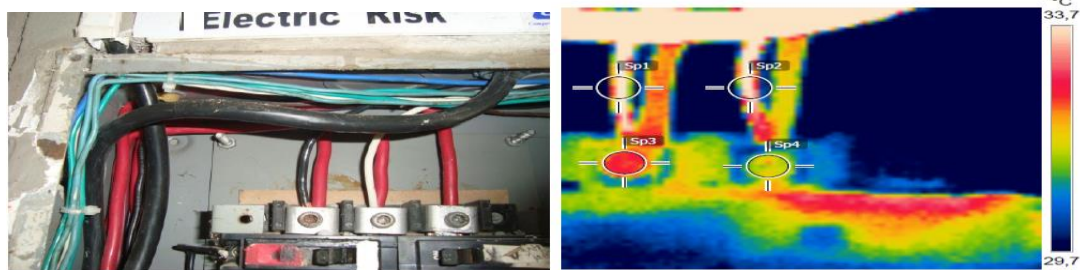
A análise foi realizada antes e depois da instalação do SFCR Figuras 81 e 82 e baseada na metodologia ANSI/IEEE C37.010-4.4.3 para instalações elétricas. A câmara utilizada é de marca FLIR I5, com uma emissividade de 0,8, sensibilidade térmica 0,1 °C e exatidão de $\pm 2\%$.

Para analisar os resultados obtidos é verificado as normatividades relevantes para o análise termográfica na Colômbia, é a norma NTC 2050, a que estabelece através temperaturas ambientes de operação, o dimensionamento dos circuitos, mas não especifica a temperatura de operação. Por isso, é utilizado para avaliar esses dados, manuais de operação da empresa de câmeras de imagem térmica FLUKE que especifica valores de referência para transformadores e circuitos de baixa tensão.

Em placas elétricas é sinal de aviso que os componentes superem $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente ou $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação a outros componentes semelhantes. Em transformadores elétricos a temperatura ambiente especificada deve ser de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo aceite que $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ acima desta temperatura significaria a redução de um 50% a vida útil do transformador. (Inspecting Electrical Vaults & Monitoring Transformers, 2005.)

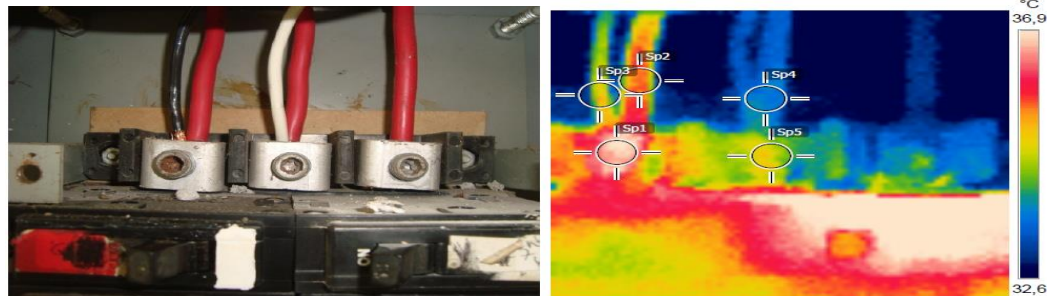
Segundo os resultados reportados nas Figuras 81, 82 e Tabela 51. Sem o SFCR, o sistema opera com uma temperatura máxima de $34,3^{\circ}\text{C}$ e mínima de $31,4^{\circ}\text{C}$. O incremento no PCC devido à operação do SFCR é de 7,5%, sendo a temperatura máxima de $36,9^{\circ}\text{C}$ e mínima de $33,7^{\circ}\text{C}$. No entanto, este incremento é incluído dentro dos requerimentos estabelecidos pela Norma NTC 2050 e BWG, para emitir o aviso.

Figura 81 - Análise termográfica antes da operacionalização do SFCR.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 82 - Análise termográfica depois da operacionalização do SFCR



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 38 - Resultados da análise termográfica antes e depois da operacionalização do SFCR.

Medição	Antes	Depois	NTC 2050
Sp1	$34,3^{\circ}\text{C}$	$35,1^{\circ}\text{C}$	70°C
Sp2	$34,2^{\circ}\text{C}$	$33,7^{\circ}\text{C}$	70°C
Sp3	$32,4^{\circ}\text{C}$	$36,9^{\circ}\text{C}$	70°C
Sp4	$31,4^{\circ}\text{C}$	$35,0^{\circ}\text{C}$	70°C
Emissividade	0,8	0,8	
Temperatura de Reflexão	28°C	28°C	

Fonte: Produção do próprio autor.

6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO

6.1 CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica foram montados módulos em vários prédios da UI, sendo sete blocos, o Centro de Educação Permanente, o Centro de línguas e o prédio da Faculdade de direito. Os módulos, parte de rede experimental de 7.8 kWp, ocupam um área de 57,15 m² (Tabela 39), para uma densidade de potência de 0,136 kWp/m². Logo, a capacidade máxima de geração de energia elétrica foi calculada segundo a área total disponível em cada prédio que cumpre com os requerimentos para instalações fotovoltaicas Tabela 40.

Tabela 39 - Medições diretas da área utilizada pelos módulos fotovoltaicos da rede experimental.

Dimensões da rede experimental	Longitude (m)
Cumprimento	3,76
Largura	15,20
Área total [m²]	57,15

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 40 - Área disponível para a implementação do sistema fotovoltaico.

Dependência	Área disponível [m²]	Energia produzida [kWh]
Bloco 1	377,76	51
Bloco 2	352,83	48
Bloco 3	352,82	48
Bloco 4	324,04	44
Bloco 5	348,70	47
Bloco 6	296,19	40
Bloco 7	511,86	70
Centro de educação permanente	1.175,60	160
Centro de línguas	485,65	66
Faculdade de direito	510,56	69
Total	4.736,01	643

Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, a máxima Energia produzida pela rede experimental de 643 kWh, incluindo a totalidade da área disponível de 4.736 m², resulta muito maior do que a energia requerida de 220 kWh em horário de ponta. Considerando as cinco Horas de Sol de Pico (HSP) calculadas a partir das medições de radiação solar, seria possível obter a geração de 96,45 MWh/mês para atender a demanda de 60 MWh/mês. O excesso de 36,45 MWh/mês durante o período acadêmico e de 66,45 MWh/mês no período de recesso poderiam ser comercializados com a empresa de energia local.

6.2 INCENTIVOS PARA O INVESTIMENTO EM PROJETOS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NA COLÔMBIA

O Artigo 11 da lei 1715 de 2014 trata sobre os incentivos na geração de energia a fim de fomentar a pesquisa, desenvolvimento e investimento na produção e utilização de energia a partir de fontes renováveis e da gestão eficiente da energia. Esta lei permite a aqueles que declaram imposto de renda, e façam investimentos nesta área, possam obter uma redução de 50% sobre o valor investido durante cinco anos.

O valor cobrado não poderá ultrapassar o 50% do total da renda do contribuinte, uma vez seja descontado o valor do investimento. Para obter este benefício, o investimento deve receber uma certificação do Ministério do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Colômbia para evidenciar o benefício ambiental, de acordo com o estabelecido no artigo 158-2 do estatuto tributário.

O Artigo 12 da mesma lei também é relacionado com o fomento ao aproveitamento de energias renováveis. Neste caso, o artigo estabelece a redução de 19% do Imposto sobre o Valor Acrescentado (IVA) na compra de bens (equipamentos, componentes, maquinária) e serviços (nacionais ou importados) destinados ao pre-investimento e investimento na geração e uso de energia a partir de fontes renováveis. A mesma redução também é aplicada para os estudos de avaliação de potenciais energéticos.

O artigo 13 é do tipo tarifário e beneficia às pessoas, naturais ou jurídicas, que sejam titulares de novos investimentos em projetos para o aproveitamento de fontes renováveis. Assim, os pagamentos das tarifas de importação de bens (equipamentos, maquinária, materiais e

insumos) destinados exclusivamente a projetos com fontes renováveis, durante o pre-investimento e investimento, terão uma redução de 15% do custo total.

Finalmente, o artigo 14 estabelece que as atividades de geração a partir de fontes renováveis serão beneficiadas com o regime de depreciação acelerada, que é aplicado sobre os ativos (maquinária, equipamentos e obras civis) requeridos durante as fases de pre-investimento, investimento e operação nos projetos de geração de energia com fontes renováveis. Desta forma, a taxa global anual de depreciação não será inferior de 20%, a qual poderá variar de acordo com a decisão do titular do projeto.

6.3 COMERCIALIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

6.3.1 Venda de energia elétrica a partir de geradores distribuídos

A energia obtida por geração distribuída será remunerada considerando os benefícios sobre o sistema de distribuição onde é conectada, mediante o mecanismo de venda de créditos de energia elétrica. Os autogeradores favorecidos com créditos de energia, onde os excedentes são fornecidos à rede de distribuição, poderão negociar aqueles créditos e seus direitos inerentes com pessoas naturais ou jurídicas.

Durante a realização deste estudo as instituições encarregadas da implementação da lei 1715, não forneceram os procedimentos nem os regulamentos técnicos sobre a geração com fontes renováveis. Aliás, não existem os mecanismos de comercialização da energia gerada a partir de tais fontes de energia. Portanto, este projeto de geração distribuída de 163,8 kWp visa atender o 75% do consumo mínimo (30 MWh/mês) da UI, pensando no auto consumo para evitar excedentes elevados durante os finais de semana e os períodos de recesso acadêmico.

6.4 PROPOSTA TÉCNICA

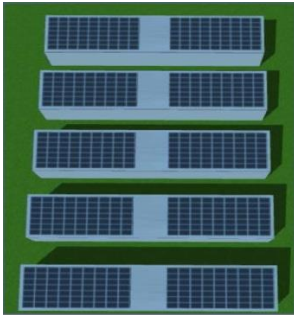
A rede experimental é composta de elementos de geração (painéis solares e cablagem), conversão de energia (inversores, transformando a corrente contínua dos painéis em corrente alternada), proteções elétricas e a parte estrutural (estrutura de suporte). A energia gerada é consumida durante o mesmo dia, reduzindo os custos de faturamento por menos energia utilizada

da rede. Durante os dias de trabalho o consumo diário de energia na UI é constante, portanto, é possível substituir grande parte desse consumo para evitar que excedentes sejam fornecidos à rede elétrica durante o recesso acadêmico.

6.4.1 Geração com painéis solares

O sistema tem uma capacidade instalada prevista de 163,8 kWp utilizando 630 painéis solares policristalinos de 260 W marca Viessmann. Os painéis têm uma eficiência de 15,9% e seguem as normas internacionais IEC 61215, IEC 61730, UL 1703, IEC 61701 e IEC 62716; também, um grau de proteção IP67 para proteção contra intempéries. Os painéis têm duas garantias, uma de 10 anos por defeitos de fabricação (a partir da data de instalação) e outra de 25 anos pela potência produzida (tempo em que o fabricante assegura uma eficiência de 80,7%). A distribuição dos painéis solares e suas características técnicas são apresentadas na Figura 83.

Figura 83 - Informação sobre os painéis solares.

Configuração	Característica	Painel solar ViessmannP-260 AA
	Potência	260,00W
	Tensão de máxima potência	30,79 V
	Corrente de máxima potência	8,52 A
	Tensão de circuito aberto $V_{ca(CST)}$	37,45 V
	Corrente de curto circuito (A_{sc})	7,25 A
	Eficiência do painel	15,9%
	Peso	20,5 kg

Fonte: Produção do próprio autor.

6.4.2 Conversão de energia

A energia elétrica obtida dos painéis solares em corrente contínua é transformada em corrente alternada pela ação dos inversores solares. Estes inversores são projetados especialmente para este tipo de aplicações, já que criam as condições de sincronismo com a rede existente a fim de gerar energia para o auto consumo. A previsão é usar dez inversores trifásicos marca Fronius 15.0 de 208 V; neste caso, nenhuma transferência automática é requerida, pois os inversores se integram com o atual sistema e utilizam o mesmo monitoramento.

Os inversores selecionados têm uma eficiência de 97,3% e seguem as normas internacionais UL 1998, IEEE 1547-2003, IEEE 1547.1-2008, ANSI/IEEE C62.41, FCC parte 15A & B, NEC Artigo 690, C22.2 número 107.1-01 (Setembro 2001), UL 1699B V2-2013, e CSA TIL M-07 V1-2013. O índice de proteção é o IP 66, portanto, são resistentes às intempéries e possuem uma única conexão com o quadro elétrico onde é adicionada uma proteção de 50A em corrente alternada.

Depois do quadro elétrico, a conexão é realizada com o quadro principal de distribuição. Devido a que a carga é muito menor durante os finais de semana e dias feriados, a rede precisa de um sistema inteligente de medição de energia elétrica para realizar o controle de injeção da potência, já incluído dentro desta proposta. Na Tabela 41 são exibidas as características técnicas dos inversores solares selecionados.

Tabela 41 - Informação sobre os painéis solares.

Tipo	Inversor de conexão a rede FRONIUS Symo 15
Corrente de carga máxima	18 A/18A
Tensão máxima de entrada	600 V
Faixa de tensão	250 – 480 V
Tensão nominal de entrada	420 V
Eficiência máxima	96,9 %
Potência nominal de saída	7.600 W
Faixa de temperatura de funcionamento	-40-+ 55°C
Tipo de proteção	IP IP 65
Fator de Potência	0,85-1 ind./cap.

Fonte: Produção do próprio autor.

6.4.3 Comunicação

O monitoramento foi fundamental na operação de um sistema fotovoltaico, foi realizado através da conexão dos inversores com o site do fabricante Fronius. O acesso ao site é gratuito e permite obter informações sobre a potência produzida, o histórico de dados, os alarmes e falhas no sistema. Na UI a conexão à Internet pode ser de três tipos: LAN, Wi-Fi e Ethernet. A conexão LAN é preferida sobre a Wi-Fi devido aos problemas na operação do sistema com as mudanças no acesso; a conexão Ethernet é a mais estável.

6.4.4 Estrutura de suporte

Os painéis solares são montados sobre uma estrutura composta de perfis de alumínio; esta estrutura é construída sobre outra estrutura base do tipo metálico fornecida pela Universidade de Ibagué.

6.5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO

A avaliação econômica foi realizada utilizando o software Retscreen, desenvolvido pelo governo do Canadá em parceria com instituições internacionais de grande importância na área energética, tais como o Centro de Pesquisa Langley da NASA, a Associação de Energia Renovável e Eficiência Energética (REEEP), o Fundo Mundial para o Meio Ambiente e o Banco Mundial. Outras instituições da indústria e da academia também participam, como o caso do Operador do Sistema Elétrico de Ontário (IESO), a Unidade de Energia da Divisão de Tecnologia, indústria e economia do PNUMA e o departamento de Energia sustentável da Universidade de York no Canadá.

O software, utilizado por mais de 490 mil pessoas no mundo, permite identificar, avaliar e otimizar rapidamente a viabilidade técnica e financeira de projetos potenciais baseados em energias renováveis. Adicionalmente, é possível obter medições para verificar o desempenho real dos sistemas, ajudando na busca de oportunidades de poupança energética e produção de energia adicional. Assim, os profissionais que gerenciam os projetos têm à disposição informações valiosas na hora da tomada de decisões.

A análise de viabilidade, realizado por estes profissionais, tem cinco fases: a análise de energia, análise de custos, análise de emissões, análise financeira e a análise de sensibilidade e riscos. Durante a análise de viabilidade são consideradas bases de dados de referência, Equipamentos, dados sobre hidrologia e clima, como também o acesso a mapas mundiais sobre recursos energéticos, projetos de energias renováveis e casos de estudo específicos.

6.5.1 Informação requerida pelo software

6.5.1.1 Informação geral

O projeto começa a ser definido logo de preencher as informações sobre o nome e tipo do projeto, sua localização, tecnologia utilizada, análise a realizar, seleção do idioma de ingresso de texto, unidade monetária, dados do clima e sistema de unidades (vide Figura 84). Em relação às informações sobre o clima, foi utilizada a base de dados da NASA para a cidade de Purificación, localizada a 100 km da cidade de Ibagué. Isto devido a que os dados da estação meteorológica do aeroporto Perales não estavam disponibilizados pela NASA, ademais, não foi possível incluir um maior número de dados.

Figura 84 Informação preenchida para a análise econômica no software RETScreen.

Informação sobre o projeto		Veja banco de Dados do projeto	
Nome do Projeto	Projeto de implementação de um sistema de 163,8 kWp na		
Localização do Projeto	Universidad de Ibaguè		
Preparado para	Complemento de doctorado Agustin Valverde		
Preparado por	Agustin Valverde Granja		
Tipo de projeto	Produção de eletricidade		
Tecnologia	Fotovoltaica		
Tipo de grid	Rede central & carga interna		
Tipo de análise	Método 2		
Poder calorífico de referência	Poder Calorífico Inferior (PCI)		
Ver parâmetros	<input checked="" type="checkbox"/>		
Idioma	Portuguese - Português		
Manual do usuário	English - Anglais		
Moeda	\$		
Unidades	Unidades métricas		
Condições de Referência do site		Selecionar local de dados climáticos	
Localização dos dados climáticos	Purificación		
Mostrar dado	<input checked="" type="checkbox"/>		

	Localização dos dados climáticos		Localização do Projeto	
	Unidade		Unidade	
Latitude	N	3,9	N	3,9
Longitude	E	-74,9	E	-74,9
Elevação	m	1.716	m	1.716
Temperatura para projeto de aquecimento	°C	16,1		
Temperatura para projeto de refrigeração	°C	26,4		
Amplitude da Temperatura do Solo	°C	9,2		

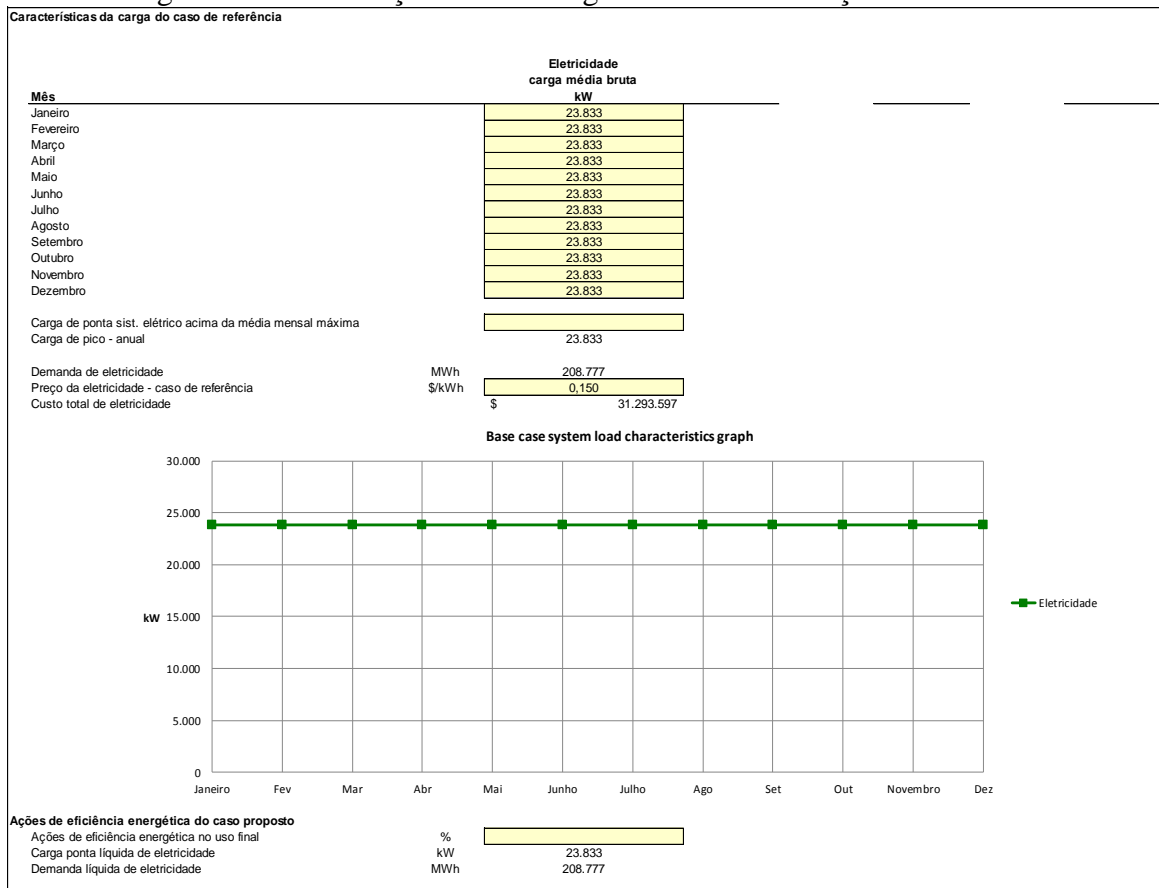
Mês	Temperatura do Ar	Humidade relativa	Radiação solar diária - horizontal	Pressão Atmosférica	Velocidade do Vento	Temperatura do Solo	Graus-dia para aquecimento	Refrigeração
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Janeiro	20,9	75,2%	4,99	88,8	1,6	22,2	0	339
Fevereiro	21,1	75,3%	4,88	88,8	1,7	22,5	0	311
Março	21,2	77,7%	4,90	88,8	1,7	22,7	0	347
Abril	21,1	78,9%	4,64	88,9	1,6	22,6	0	332
Maio	21,1	76,0%	4,72	88,9	1,7	22,6	0	344
Junho	20,6	74,1%	4,82	89,0	2,1	22,0	0	319
Julho	21,0	64,4%	4,78	89,0	2,1	22,6	0	341
Agosto	22,2	56,4%	4,87	89,0	1,9	24,1	0	377
Setembro	22,7	57,1%	4,97	88,9	1,7	24,9	0	382
Outubro	22,1	66,6%	4,72	88,8	1,6	24,1	0	376
Novembro	21,1	76,8%	4,64	88,8	1,5	22,5	0	334
Dezembro	20,8	78,8%	4,78	88,8	1,7	21,9	0	333
Anual	21,3	71,4%	4,81	88,9	1,7	22,9	0	4.135
Medido a	m				10,0	0,0		

Fonte: Produção do próprio autor.

6.5.1.2 Características da carga

A carga foi definida a partir da Energia produzida pelo sistema fotovoltaico (23,83 MWh/mês), associada a sua capacidade instalada de 163,8 kWh/mês, e considerando 4,86 horas de operação por dia durante todos os meses do ano. O custo da eletricidade inclui as taxas de iluminação pública, ele para a Colômbia corresponde a 14% do consumo; isto é, 0,150 USD/kWh (vide Figura 85).

Figura 85 - Informação sobre a carga elétrica na avaliação econômica.



Fonte: Produção do próprio autor.

6.5.1.3 Sistema de geração elétrica proposto

As informações sobre o sistema fotovoltaico dimensionado foram adicionadas no software, sendo: o tipo de análise a realizar, o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos, as características técnicas dos painéis e dos inversores, e finalmente, os diferentes fatores de perda no sistema. A Figura 86 apresenta os dados utilizados.

Figura 86 - Informação sobre o sistema fotovoltaico proposto.

Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade Mostrar outras unidades

Sistema de eletricidade do caso proposto

Tipo de análise Método 1
 Método 2

Avaliação de recursos

Sistema de posicionamento solar Fixo

Inclinação 14,0

Azimut 14,0

Mostrar dado

Mês	Radiação solar diária - horizontal kWh/m²/d	Radiação solar diária - inclinada kWh/m²/d	Preço eletricidade exportada \$/MWh	Eletricidade exportada p/ rede MWh
Janeiro	4,99	5,32	149,9	0,000
Fevereiro	4,88	5,03	149,9	0,000
Março	4,90	4,88	149,9	0,000
Abril	4,64	4,46	149,9	0,000
Mai	4,72	4,39	149,9	0,000
Junho	4,82	4,40	149,9	0,000
Julho	4,78	4,40	149,9	0,000
Agosto	4,87	4,61	149,9	0,000
Setembro	4,97	4,88	149,9	0,000
Outubro	4,72	4,81	149,9	0,000
Novembro	4,64	4,88	149,9	0,000
Dezembro	4,78	5,13	149,9	0,000
Anual	4,81	4,76	149,89	0,000

Radiação Solar anual - horizontal MWh/m² 1,76
 Radiação Solar anual - inclinado MWh/m² 1,74

Fotovoltaica

Tipo poly-Si

Potência elétrica kW 163,80

Fabricante Yingli Solar

Modelo poly-Si - YL260P-35b 630 unidade(s)

Eficiência % 15,9%

Temperatura de operação normal da célula °C 45

Coefficiente de Temperatura % / °C 0,40%

Área do coletor solar m² 1,030

Perdas diversas % 20,0%

Inversor

Eficiência % 97,3%

Capacidade kW 15,0

Perdas diversas % 2,7%

Resumo

Fator de Utilização % 14,1%

Eletricidade fornecida à carga MWh 202,265

Eletricidade exportada p/ rede MWh 0,000

Estratégia de operação - carga básica do sistema de eletricidade

Preço da eletricidade - caso de referência \$/MWh 149,89

Preço do combustível - caso proposto sistema elétrico \$/MWh 0,00

Preço da Eletricidade - caso proposto \$/MWh 149,89

Estratégia de operação	Eletricidade fornecida à carga MWh	Eletricidade exportada p/ rede MWh	Eletricidade complemento necessário MWh	Combustível para produzir eletricidade MWh	Lucro (prejuízo) Operacional \$	Eficiência %
Potência elétr.máx.de saída	202	0	208,575	0	30.318	-
Acompanhando carga elétrica	202	0	208,575	0	30.318	-

Selecionar estratégia de operação Potência elétr.máx.de saída

[Ver banco de dados de produtos.](#)

[Completar planilha Análise de Custos](#)

Fonte: Produção do próprio autor.

6.5.1.4 Custo do investimento

O custo do investimento foi calculado como a soma do custo do estudo de viabilidade, o custo de desenvolvimento, custos de engenharia, custos do sistema de geração de energia, custo do balanço do sistema e custos diversos. Os custos unitários em dólares americanos são disponibilizados na Tabela 42, e a distribuição dos custos na Figura 87.

Tabela 42 - Relação de custos unitários do sistema.

Quantidade	Modelo	Custo unitário [USD]	Custo total [USD]
630	Painel fotovoltaico policristalino Viessmann 260W	135,81	85.560,30
9216 m	Cablagem de painéis fotovoltaicos (com ligação térmica)	1,08	9.953,28
278,50 m	Cablagem CA AWG 10	11,82	3.291,87
10	Acessórios de montagem	279,84	2.798,40
10	Proteção contra sobretensões CC	278,87	2.788,70
60	Conectores Multicontact NC4	3,24	194,40
1	Inversor Fronius primo 15,0 (Mestre)	5.602,11	5.602,11
9	Inversor Fronius primo 15,0 (Escravo)	5.273,33	47.459,97
1	Estação meteorológica	1.194,91	1.194,91
1	Estrutura de alumínio	34.779,31	34.779,31
1	Estrutura de suporte do coletor de aço HR	16.750	16.750
1	Instalação	30.682	30.682
1	Custo de manutenção do sistema por mês	3.522	3.522

Fonte: Produção do próprio autor.

A estimativa dos indicadores utilizados na avaliação econômica do projeto foi possível a partir da implementação da rede experimental, onde os custos associados foram assumidos como os custos iniciais na análise de viabilidade. Como resultado, a distribuição relativa daqueles custos sobre o custo total do projeto foi de 4,4% para o estudo de viabilidade; 1,6% para o desenvolvimento do projeto; 1,4% para os custos de engenharia (supervisão do projeto); 53,3% para os custos de aquisição do sistema de geração de energia e 39,3% para os custos do sistema de conversão e os custos diversos.

O custo total do investimento foi exatamente de 353 mil dólares (vide Figura 87); portanto, o custo estimado do kW instalado resulta ser menor em relação à faixa reportada em estudos de custos de sistemas de geração de energia similares no exterior (IRENA; IEA, 2013); isto é devido aos incentivos tributários oferecidos pelo governo da Colômbia. Na Figura 88 nota-se que o custo é maior para as usinas geotérmicas (2.200 USD/kW), seguido

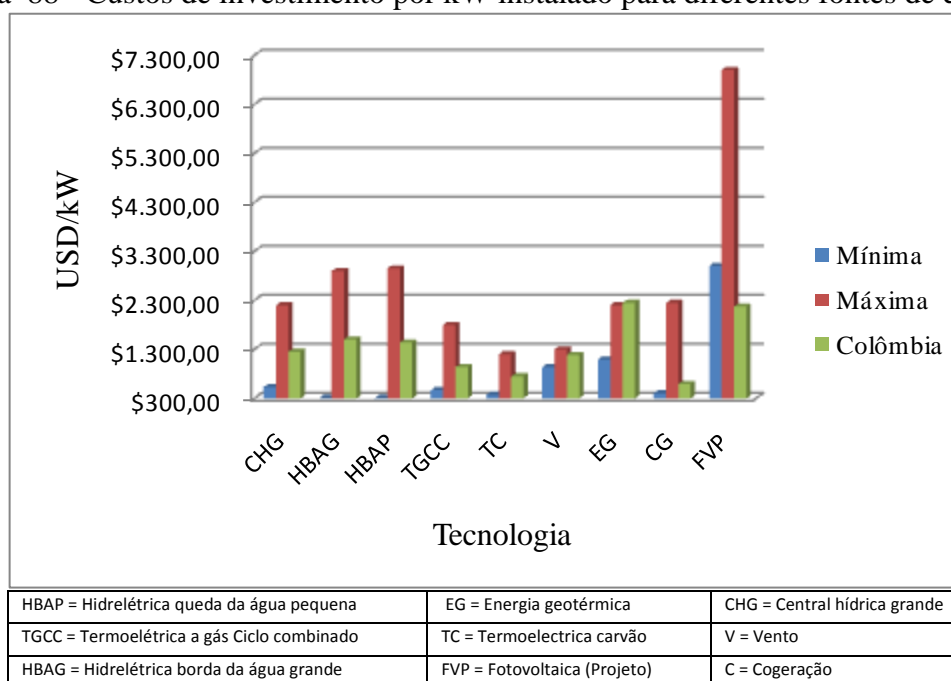
dos sistemas fotovoltaicos (2100 USD/kW); o custo mais baixo é para as usinas de cogeração com biomassa (500 USD/kW).

Figura 87 - Análise dos custos do sistema fotovoltaico.

Opções					
<input type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input checked="" type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
	<input type="radio"/> Alocação de custo				
Custos iniciais (créditos)					
	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
Estudo de viabilidade					
Pesquisa de campo	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Avaliação de recursos	projeto	1	\$ 14.425	\$ 14.425	14,425
Avaliação Ambiental	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Projeto preliminar	d-p	1	\$ 1.200	\$ 1.200	1,200
Estimativa detalhada de custos	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Estudo da linha de base e PS dos GEE	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Preparação de relatório	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Gestão do Projeto	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Viagem & Acomodação	p-viagem	0	\$ -	\$ -	-
Definido pelo usuário	custo	0	\$ -	\$ -	-
Subtotal				\$ 15.625	4,4%
Desenvolvimento					
Negociação do contrato	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Licenças e aprovações	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Visita de campo e registros	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Validação e Registro do GEE	projeto	1	\$ 2.000	\$ 2.000	2,000
Financiam. do projeto	d-p	1	\$ 2.000	\$ 2.000	2,000
Serviços jurídicos e contábeis	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Gestão do Projeto	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Viagem & Acomodação	p-viagem	3	\$ 500	\$ 1.500	1,500
Definido pelo usuário	custo	0	\$ -	\$ -	-
Subtotal				\$ 5.500	1,6%
Engenharia					
Projeto do prédio	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Projeto mecânico	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Projeto elétrico	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Projeto civil	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Licitação & contratação	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Supervisão da construção	d-p	1	\$ 5.000	\$ 5.000	5,000
Definido pelo usuário	custo	0	\$ -	\$ -	-
Subtotal				\$ 5.000	1,4%
Sistema de produção de eletricidade					
Carga de base - Fotovoltaica	kW	163,80	\$ 522	\$ 85.561	85,561
Carga de Ponta - Eletricidade da Rede	kW	23.833,00	\$ -	\$ -	-
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	-
Linha de Transmissão	km	1	\$ 19.030	\$ 19.030	19,030
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Ações de Eficiência energética	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Definido pelo usuário	custo	0	\$ -	\$ -	-
Estrutura suporte de coletor de acero		5	\$ 16.750	\$ 83.750	83,750
Subtotal				\$ 188.341	53,3%
Balanco do sistema e misc.					
Custos específicos do projeto					
Fotovoltaica					
Inversor	kW	1	\$ 53.062	\$ 53.062	53,062
Estrutura de suporte do coletor	m ²	1	\$ 34.779	\$ 34.779	34,779
Instalação	projeto	1	\$ 30.682	\$ 30.682	30,682
Construção do prédio e do pátio	m ²	0	\$ -	\$ -	-
Peças de reposição	%	0,0%	\$ -	\$ -	-
Transporte	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Treinamento & Comissionamento	d-p	0	\$ -	\$ -	-
Definido pelo usuário	custo	0	\$ -	\$ -	-
Contingências	%	4,0%	\$ 332.989	\$ 13.320	13,320
Juros durante a construção	12,00%	4 mes(es)	\$ 346.308	\$ 6.926	6,926
Subtotal				\$ 138.769	39,3%
Total de custos de investimento					
				\$ 353.235	100,0%
Custo anual (créditos)					
	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	
O&M					
Locação de recurso & arrendamento do terreno	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Imposto territorial	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Seguro	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Peças e mão de obra	projeto	0	\$ -	\$ -	-
M & V dos GEE	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Benefícios à sociedade	projeto	0	\$ -	\$ -	-
Geral e administrativo	%	0,0%	\$ -	\$ -	-
Definido pelo usuário	custo	1	\$ 3.522	\$ 3.522	3,522
Contingências	%	4,0%	\$ 3.522	\$ 141	141
Subtotal				\$ 3.663	
Custo combustível - caso proposto					
Eletricidade	MWh	208.575	\$ 149,890	\$ 31.263.279	31,263,279
Subtotal				\$ 31.263.279	
Economia anual					
	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	
Custo combustível - caso de referência					
Eletricidade	MWh	208.777	\$ 149,890	\$ 31.293.597	31,293,597
Subtotal				\$ 31.293.597	
Custos periódicos (créditos)					
	Unidade	Ano	Custo unitário	Quantidade	
Definido pelo usuário	custo	2017	\$ 77.611	\$ 77.611	77,611
Valor residual do projeto	custo		\$ 77.611	\$ 77.611	77,611

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 88 - Custos de investimento por kW instalado para diferentes fontes de energia.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os custos de operação e manutenção foram estimados de acordo com o orçamento realizado pelo fabricante dos painéis fotovoltaicos para realizar os trabalhos de manutenção cada três meses. O custo para o caso da rede experimental é de 3.663 dólares e corresponde a 22,36 USD/kW, menor ao valor utilizado na Europa de 25 USD/kW em projetos similares.

6.5.1.5 Análise de redução de emissões

O cálculo da redução de emissões de gases de efeito estufa de um projeto de geração de energia é baseado no chamado fator marginal de emissão de gases de efeito estufa do sistema elétrico. Este fator, igual a 0,374 tonCO₂/MWh, foi definido no Artigo 1 da Resolução N° 91304 de 25 de Novembro de 2014 do governo da Colômbia. Como resultado, a redução anual equivalente neste projeto é de 85,8 tonCO₂ para um total de 2.144 TonCO₂ durante os 25 anos de vida útil; isto corresponde às emissões provenientes de 393 automóveis (vide Figura 89).

Neste projeto o valor assumido foi de 12 dólares por tonelada de CO₂ equivalente (USD/tCO₂e), que resulta menor em comparação ao valor de 16 USD/tCO₂e encontrado outros estudos similares (IMCO, 2012). No entanto, o valor assumido é maior do valor de 8,3 USD/tCO₂e registrado durante 2012 nas transações voluntárias de carbono na América Latina

(PETERS; YIN, 2013). Contudo, este resultado é sensível a mudanças no preço do carbono no futuro incerto, portanto, assume-se que não tem variação no tempo.

Figura 89 – Redução de emissões de gases efeito estufa no software Retscreen.

Análise da Redução das Emissões RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Análise de Emissões											
<input type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input checked="" type="radio"/> Método 3		Potencial de Aquecimento global dos GEE <table border="1"> <tr> <td>25</td> <td>tons CO2 = 1 ton CH4</td> </tr> <tr> <td>298</td> <td>tons CO2 = 1 ton N2O</td> </tr> </table>						25	tons CO2 = 1 ton CH4	298	tons CO2 = 1 ton N2O
25	tons CO2 = 1 ton CH4										
298	tons CO2 = 1 ton N2O										
Sistema elétrico de referência (Baseline)											
Tipo de Combustível	Mix do combustível %	Fator de emissão de CO2 kg/GJ	Fator de emissão de CH4 kg/GJ	Fator de emissão de N2O kg/GJ	Eficiência na geração de eletricidade %	Perdas T&D %	Fator de emissão de GEE tCO2/MWh				
Hidro	100,0%	103,9	0,0000	0,0000	90,0%	2,0%	0,424				
Mix de Eletricidade	100,0%	117,8	0,0000	0,0000		2,0%	0,424				
<input type="checkbox"/> Mudanças na linha de base durante projeto											
Sumário dos GEE do caso de referência(Baseline)											
Tipo de Combustível	Mix do combustível %	Fator de emissão de CO2 kg/GJ	Fator de emissão de CH4 kg/GJ	Fator de emissão de N2O kg/GJ	Consumo de combustível MWh	Fator de emissão de GEE tCO2/MWh	Emissão de GEE tCO2				
Eletricidade	100,0%	117,8	0,0000	0,0000	208.777	0,424	88.521,5				
Total	100,0%	117,8	0,0000	0,0000	208.777	0,424	88.521,5				
Sumário GEE do caso proposto (Projeto produção de Eletricidade)											
Tipo de Combustível	Mix do combustível %	Fator de emissão de CO2 kg/GJ	Fator de emissão de CH4 kg/GJ	Fator de emissão de N2O kg/GJ	Consumo de combustível MWh	Fator de emissão de GEE tCO2/MWh	Emissão de GEE tCO2				
Solar	0,1%	0,0			202	0,000	0,0				
Eletricidade	99,9%	117,8	0,0000	0,0000	208.575	0,424	88.435,7				
Total	100,0%	117,7	0,0000	0,0000	208.777	0,424	88.435,7				
Sumário da redução de emissões dos GEE											
Projeto produção de Eletricidade	Emissões GEE Caso de referência tCO2	Emissões de GEE Caso Proposto tCO2	Redução anual bruta de emissões de GEE tCO2	Custo de transação dos créditos de GEE %	Redução anual líquida de emissões de GEE tCO2						
	88.521,5	88.435,7	85,8	0%	85,8						
Redução anual líquida de emissões de GEE		85,8	tCO2	é equivalente a	15,7	Carros e camionetes não utilizados					

Fonte: Produção do próprio autor.

6.5.1.6 Parâmetros financeiros

A análise de custos e benefícios em projetos de médio e longo prazo é realizada utilizando a taxa de desconto; quanto maior for a taxa, menores são os custos para todas as tecnologias. Isto é devido a que tais custos são calculados a partir do Valor Presente Líquido (VPL) que inclui todos os custos no projeto, os quais são decrescentes no tempo porque os investimentos de capital são realizados nos primeiros anos.

Para a análise financeira neste projeto foram considerados os seguintes parâmetros, definidos de acordo com a metodologia geral para a formulação e avaliação de projetos de investimento público na Colômbia: uma taxa de desconto de 12% para projetos de

investimento, um reajuste médio de 5% anual no preço da energia elétrica e uma taxa de inflação atual de 6,7% (com tendência a diminuir nos próximos anos).

Figura 90 - Parâmetros financeiro utilizados

Parâmetros financeiros			
Geral			
Reajuste do custo do combustível	%		5,0%
Taxa de inflação	%		6,7%
Taxa de desconto	%		12,0%
Vida do projeto	ano		25
Financiamento			
Incentivos e subsídios	\$		133.575
Razão da dívida	%		2,0%
Empréstimo	\$		7.131
Capital próprio investido	\$		349.416
Taxa de juros da dívida	%		23,00%
Duração da dívida	ano		10
Pagamento da dívida	\$/an		1.877
Análise do imposto de renda			
Custo efetivo- imposto de renda	%	<input checked="" type="checkbox"/>	0,0%
Postergar prejuízo?			Não
Método de depreciação			Linear
Base da taxa de depreciação	%		100,0%
Período de depreciação	ano		25
Isenção fiscal ?	sim/não		Sim
Duração isenção fiscal	ano		5
Receita anual			
Receita com eletricidade exportada			
Receita pela redução de GEE <input checked="" type="checkbox"/>			
Redução líquida de GEE	tCO2/an		86
Redução líquida de GEE - 25 anos	tCO2		2.144
Crédito para redução de GEE	\$/tCO2		25,00
Receita pela redução de GEE	\$		2.144
Duração do crédito para redução de GEE	ano		25
Redução líquida de GEE - 25 anos	tCO2		2.144
Taxa de indexação do crédito para redução de GEE	%		10,0%
Receita (ou desconto) adicional do consumidor <input type="checkbox"/>			
Outras receitas (custo) <input type="checkbox"/>			
Receita da produção de Energia Limpa (EL) <input checked="" type="checkbox"/>			
Produção de EL	MWh		208.575
Crédito de produção de EL	\$/kWh		
Receita da produção de EL	\$		
Duração do crédito de produção de EL	ano		
Taxa de indexação do crédito de produção de EL	%		
Tipo de Combustível			
Eletricidade	Energia Fornecida (MWh)		208.575
Solar			202
			Sim
			Não

Fonte: Produção do próprio autor

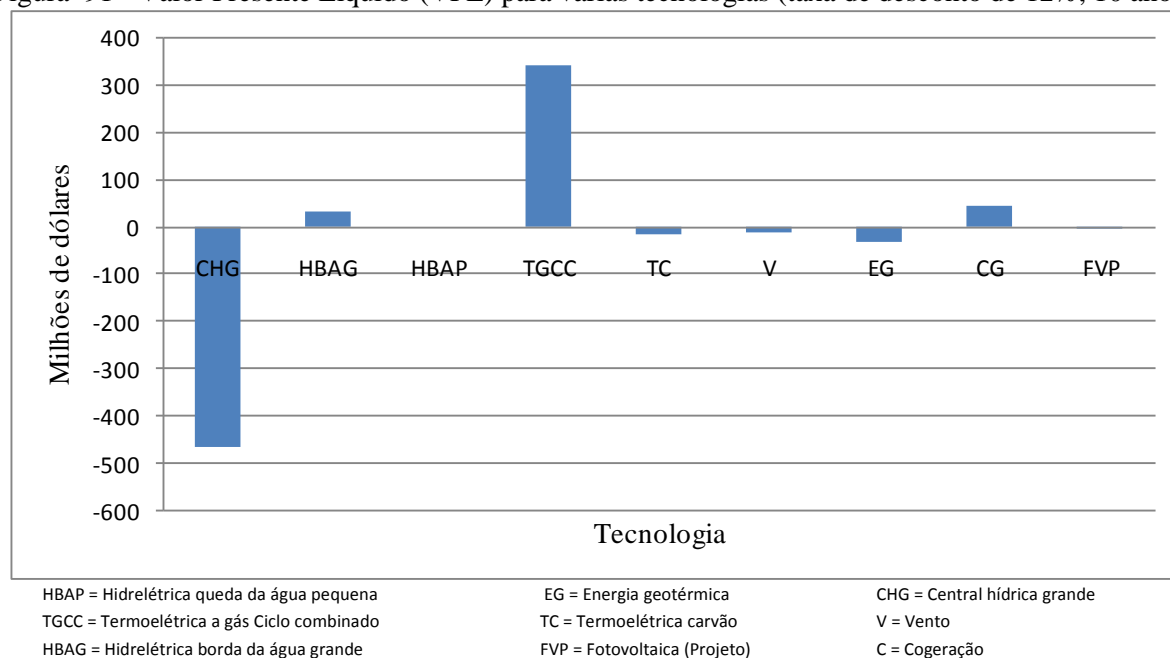
6.5.1.7 Valor Presente Líquido

Definido como a diferença entre os valores atuais das entradas (benefícios) e das saídas (custos e investimentos), o Valor Presente Líquido (VPL) representa a riqueza adicional conseguida no projeto com a melhor opção quando for maior de zero ($VPL > 0$). Este parâmetro também permite evidenciar o tamanho e rentabilidade do projeto porque, segundo a taxa de desconto utilizada, ele responde de maneira diferente em cada caso.

Ao calcular o VPL para diferentes tecnologias aplicadas na Colômbia, para um período de dez anos unicamente quatro delas apresentam um valor positivo (vide Figura 90), sendo em ordem as termelétricas de ciclo combinado (USD 343,75 Milhões), usinas de cogeração (USD 46,87 Milhões), hidrelétricas a fio da água (USD 31,25 Milhões) e energia solar fotovoltaica (USD 0,80 Milhões). Devido a que o imposto por confiabilidade não está definido para algumas tecnologias na Colômbia, não foi considerado na análise anterior.

Neste projeto o VPL começa a ser positivo a partir de 6,3 anos, sendo rentável durante um período de 18,5 anos. Durante esse tempo o sistema fotovoltaico opera com eficiência de 15,90%, porém, a eficiência diminui para 12,83% até chegar aos 35 anos (vide Figura 91).

Figura 91 - Valor Presente Líquido (VPL) para várias tecnologias (taxa de desconto de 12%, 10 anos).



Fonte: Produção do próprio autor.

6.5.1.8 Taxa Interna de Retorno

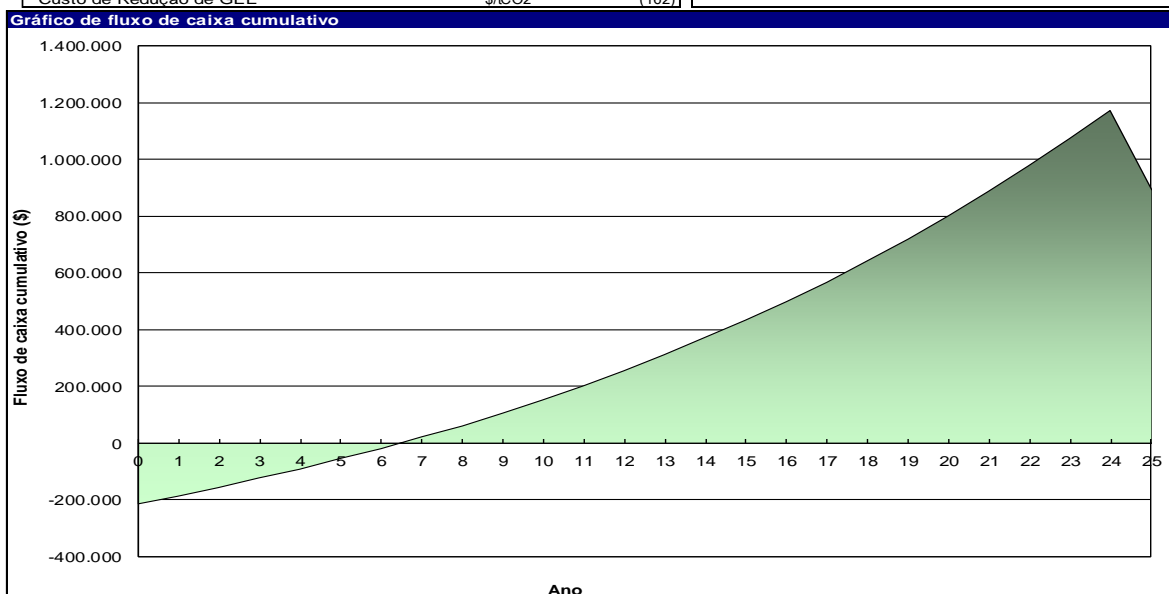
A Taxa Interna de Retorno (TIR) é aquela que iguala as entradas e as saídas do projeto; ou seja, cobre apenas o custo do investimento, operação e rentabilidades sacrificadas com os ganhos do projeto. Um valor por cima da taxa de desconto é desejável, sempre que existir geração de desembolsos nos primeiros anos e geração de benefícios nos anos posteriores. Neste caso a TIR é de 17,8% (vide Figura 93), sendo maior das registradas em projetos de energia geotérmica (5%), energia eólica (11%), hidrelétrica a fio d'água (11%) e hidrelétrica de grande porte (10%). A TIR do projeto é superada só pela cogeração (36%), termelétricas a

carvão (21%) e as termelétricas a gás (25%); portanto, pode ser considerada como uma quarta opção de interesse para a Colômbia (vide Figura 93).

Figura 92 - Valor presente Líquido (VPL) do projeto obtido com o software Retscreen.

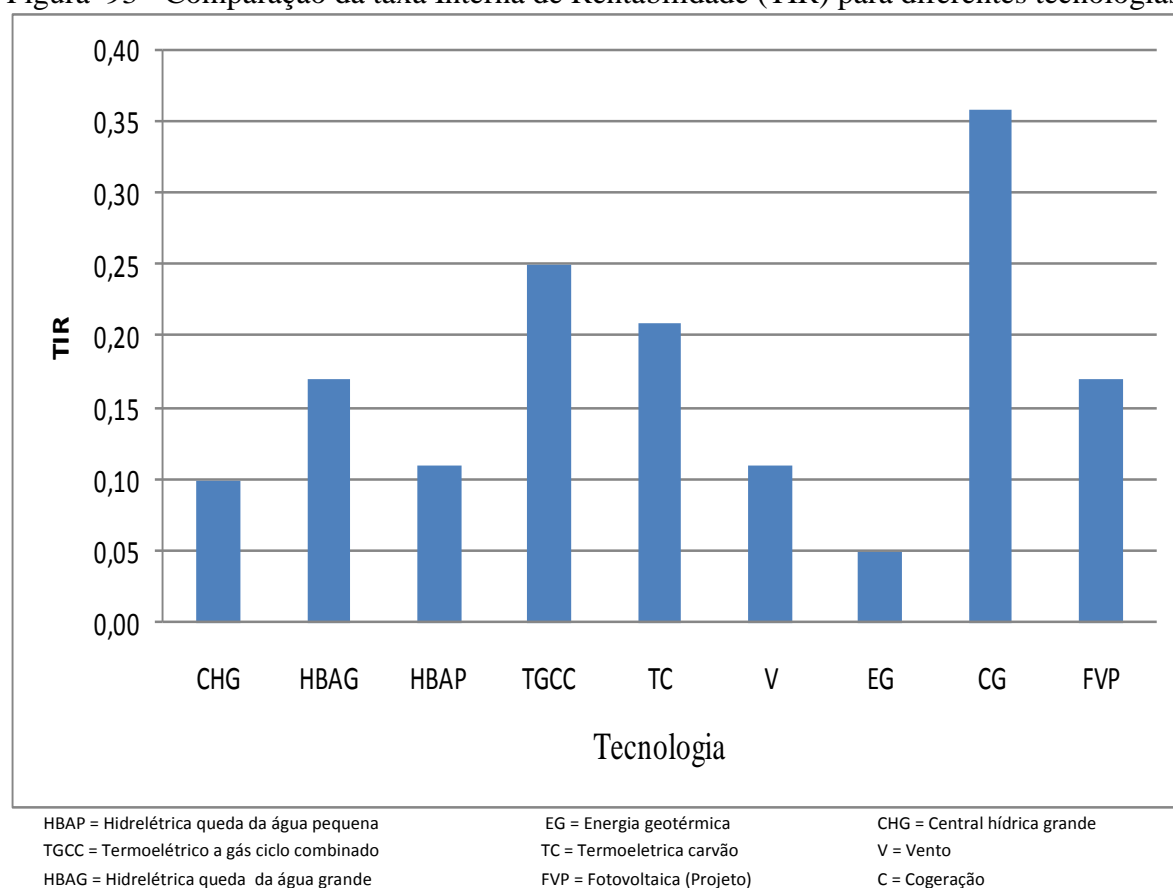
Custo projeto e sumario econ./receita				Fluxo de caixa anual			
Custos iniciais				Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
Estudo de viabilidade	4,4%	\$	15.625	#	\$	\$	\$
Desenvolvimento	1,6%	\$	5.500	0	-212.595	-212.595	-212.595
Engenharia	1,4%	\$	5.000	1	28.424	28.424	-184.171
Sistema de produção de eletricidade	53,3%	\$	188.341	2	29.990	29.990	-154.181
				3	31.641	31.641	-122.540
				4	33.383	33.383	-89.157
				5	35.221	35.221	-53.936
				6	37.162	37.162	-16.774
				7	39.211	39.211	22.437
				8	41.375	41.375	63.813
				9	43.662	43.662	107.475
				10	46.080	46.080	153.555
				11	50.495	50.495	204.050
				12	53.199	53.199	257.248
				13	56.059	56.059	313.307
				14	59.088	59.088	372.395
				15	62.295	62.295	434.690
				16	65.693	65.693	500.383
				17	69.294	69.294	569.677
				18	73.113	73.113	642.790
				19	77.165	77.165	719.954
				20	81.465	81.465	801.419
				21	86.032	86.032	887.451
				22	90.884	90.884	978.335
				23	96.041	96.041	1.074.376
				24	101.526	101.526	1.175.902
				25	-285.312	-285.312	890.590
Balanco do sistema e misc.	39,3%	\$	138.769				
Total de custos de investimento	100,0%	\$	353.235				
Incentivos e subsídios		\$	133.575				
Pagamento anual de custos e empréstimos							
O&M		\$	3.663				
Custo combustível - caso proposto		\$	31.263.279				
Pagamento da dívida - 10 anos		\$	1.859				
Total de custos anuais		\$	31.268.801				
Custos periódicos (créditos)							
Definido pelo usuário - 2017 anos		\$	77.611				
Valor residual do projeto - custo		\$	77.611				
Economia anual e receita							
Custo combustível - caso de referência		\$	31.293.597				
Receita pela redução de GEE - 25 anos		\$	2.144				
Total de economia e receita anual		\$	31.295.741				

Viabil. Financeira			
TIR antes impostos-capital próprio	%		17,8%
TIR antes impostos - ativos	%		17,3%
TIR após impostos - capital	%		17,8%
TIR após impostos - ativos	%		17,3%
Retorno simples	ano		7,6
Retorno do capital próprio	ano		6,4
Valor Presente Líquido (VPL)	\$		108.947
Economia anual no ciclo de vida	\$/an		13.891
Razão custo beneficio (C-B)			1,31
Juros da dívida			16,29
Custo de Redução de GEE	\$/CO2		(162)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 93 - Comparação da taxa Interna de Rentabilidade (TIR) para diferentes tecnologias.



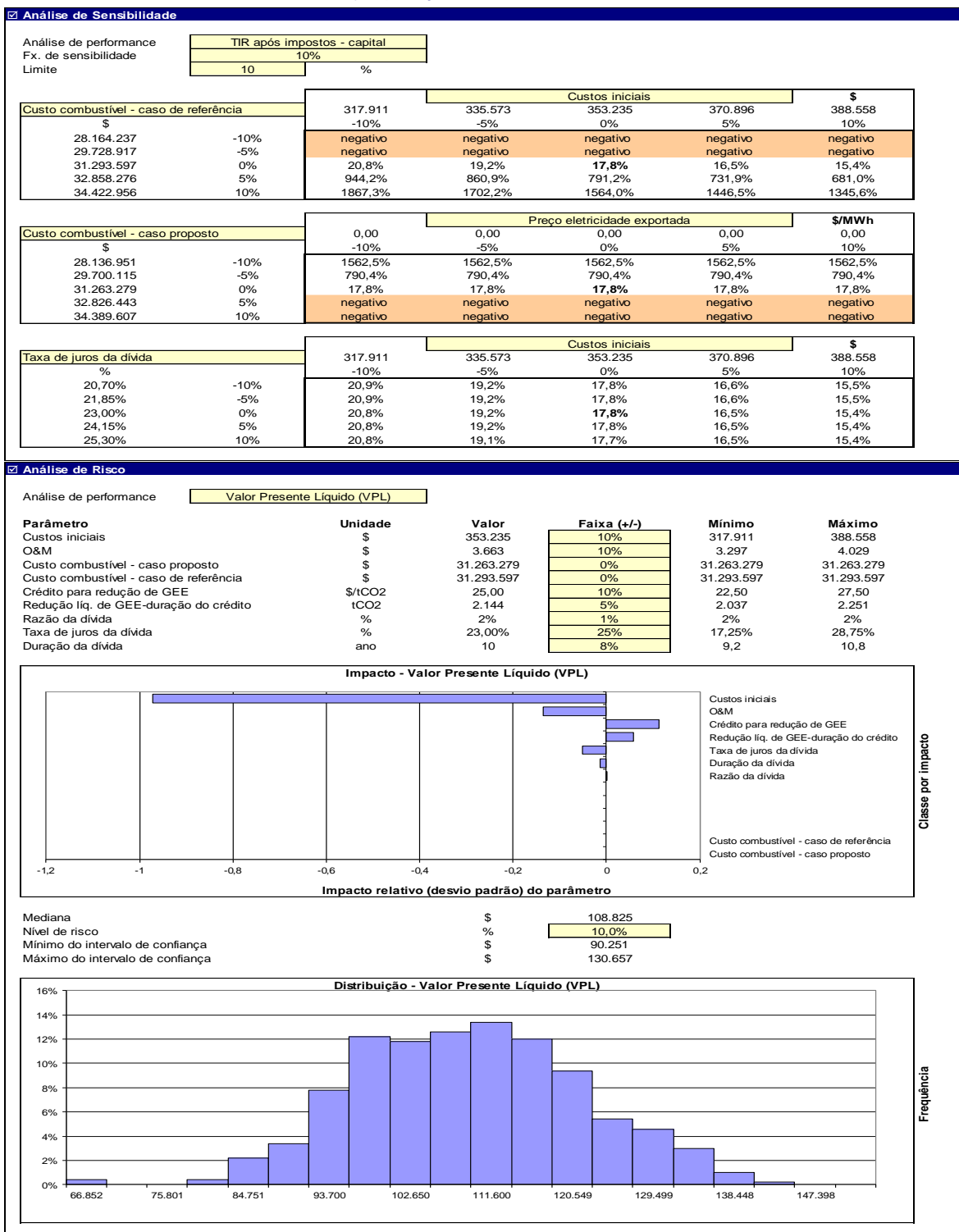
Fonte: Produção do próprio autor.

6.5.1.9 Análise de riscos

A probabilidade de ocorrência de eventos não desejados é um tema relevante. Nos projetos de engenharia existem vários fatores de risco a levar em consideração, tais como o ambiental, legal, financeiro e social, entre outros. O software RETScreen permite só incluir o fator financeiro na análise do projeto (vide Figura 94). Os resultados sugerem que as variáveis de maior impacto são os custos iniciais e os custos de operação e manutenção, com a probabilidade de 95% de obter um Valor Presente Líquido maior de 84.751 dólares; na análise, a média é de 108.825 dólares e os intervalos de confiança mínimo e máximo de 90.251 e 130.657 dólares, respectivamente.

Figura 94 - Análise de risco pelo software RetScreen.

Análise de Sensibilidade e Risco RETScreen - Projeto produção de Eletricidade



Fonte: Produção do próprio autor

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O comportamento das perturbações de longa duração, encontrados no estudo inicial da qualidade da energia na Universidade de Ibagué - Colômbia e sua comparação com normatividades existentes encontram-se resumidos na Tabela 43. Pode concluir-se que estão abaixo dos valores de referência, com a exceção dos harmônicos de corrente.

Tabela 43 - Comparação dos resultados com a CNT 5001

Perturbações de longa duração	Valor encontrado		Valor de referência NTC 5001
	Mínimo	Máximo	
Variações de tensão de estado estacionário	112,90 V	123,44 V	$108 \leq V \leq 132$
Desequilíbrio de tensão	1,15 %	1,72 %	$\leq 2,00$ %
Flicker de curta duração	0,057 p.u	0,415 p.u	$\leq 1,0$ p.u
Flicker de longa duração	0,097 p.u	0,200 p.u	$\leq 0,65$ p.u
Interrupções de longa duração	0	0	≤ 10 em 3 minutos
Harmônicos de tensão	2,13 %	3,73 %	5,00 %
Harmônicos de corrente	0,61	17,47	5
Entalhes de tensão	0	0	5 %

Os dados obtidos para as perturbações lentas encontrados no estudo inicial da qualidade da energia na Universidade de Ibagué - Colômbia e sua comparação com normatividades existentes estão em conformidade com o CNT 5001, em relação as interrupções de curta duração, abaixamento ou afundamentos de tensão (SAGS) , elevações tensão (SWELL) e variações de frequência.

De acordo com os dados apresentados de perturbações rápidas, não foram encontrados sobre tensões transitórias nos resultados, o consumo de potência ativa foi desequilibrado para as três fases, com um valor médio de 8,5 kW para linha U₃, 7,5 kW para linha U₂ e 5,0 kW para linha U₁. É evidente que pela linha U₁, o 99,11% da Energia reativa é de caráter indutiva, 99,6 para linha U₂ e para linha U₃ o 99,11% da energia reativa é de caráter capacitivo, com um valor máximo de 2,53 kVAr para linha U₁, 1,75 kVAr para linha U₂, e 1,34 kVAr para linha U₃.

Nos períodos de atividade acadêmica o fator de potência total foi maior de 0,9 com valor máxima indutivo de 0,9809 e mínimo de 0,8591. Para a parte capacitiva a máxima é 0,9770 e mínimo de 0,9412. Também pode-se estabelecer que em alguns dias das semanas o circuito apresenta problemas com o fator de potência.

Determinou-se uma HSP com um valor médio anual de 4,86 horas, uma radiação solar média de $4,79 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{dia}$ e a velocidade do vento média de $4,3 \text{ m/s}$, os dados foram obtidos com as estações marca Davis Vantagem Pro 2 Plus da Universidade de Ibaguè ea Ceiba; valor que coincide com Unidades de planejamento de Minas e Energia (UPME) tinha-se em 2005 para a cidade de Ibaguè um valor de HSP mensal de 4 a 5 horas (UPME, 2015) e com Restscreen da Organização para a Alimentação ea Agricultura (FAO), o que leva os dados da Administração Nacional de Aeronáutica e Space (NASA) para a cidade de Ibagué, aeroporto Perales (SOFTWARE RETSCREEN, 2015), encontrando-se um valor de HSP compreendido entre 5 e 6 horas e uma radiação média anual de $5,77 \text{ kWh} / \text{m}^2$ por dia, muito semelhante ao obtido.

Uma rede experimental é dimensionada, montado e colocado em operação, utilizando a metodologia proposta por CARNEIRO, 2009; MORA, 2012 e HERNANDEZ et al., 2012, composta de 30 painéis solares de 260 W marca IBC solar, um inversor marca Fronius de 7,6 kW e um contador bidirecional ligados diretamente à rede através de fio seção transversal de 6.0 mm^2 .

A energia máxima produzida pela rede experimental foi $850 \text{ kWh} / \text{mês}$, o que é equivalente a 72,65% do total da capacidade instalada foi maior do que o relatado por BURGER; Ruther, 2006; MACEDO; Zilles, 2007, de 70% e muito próximos dos valores encontrados pelo Islam, et al., 1998, entre 80 e 100%.

A energia de saída diminui 0,65% e a eficiência de conversão 0,08% por cada grau Celsius de diferença entre a temperatura do painel com a temperatura ambiente; comportamento similar ao reportado na literatura por autores como RADZIEMSKA, 2003; CHANDRASEKAR; SENTHILKUMAR; GANESH, 2013 e FENG, et al., 2014.

A temperatura superficial do painel foi calculada a partir do modelo matemático proposto neste trabalho para a cidade de Ibagué. O modelo foi resultado de uma análise estatística com o software Minitab e utilizou os dados da variação da radiação solar e da temperatura ambiente, no caso quando a temperatura do painel foi maior que a temperatura ambiente. A porcentagem de erro do modelo foi de 14,09%, sendo mais baixa do que a faixa entre 47% – 62% encontrada em outros modelos para a mesma região.

Neste caso, os painéis solares apresentaram uma eficiência máxima e mínima de 21% e 15%, respectivamente. O valor máximo foi próximo daquele reportado na ficha técnica do produto de 15,9%, e também, da faixa entre 15% – 20% determinada por RAHMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2015 em condições controladas no laboratório. Mostrouse que

a eficiência não é afetada com valores de radiação solar entre 400 e 1000 W/m², fato que também foi verificado nesta aplicação.

A eficiência do inversor foi determinada na faixa entre 75% – 94%, valores que são próximos de algumas referências. Primeiro, do valor de 88% reportado no estudo de RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2014; segundo, do valor de 96,9% apresentado na ficha técnica da marca Fronius.

A rede experimental apresentou um desempenho global (P_R) na faixa entre 0,83 – 1,30, superando as exigências do Guia Fotovoltáica Europeia entre 0,80 – 0,85. Os resultados também são similares à faixa de 0,8 – 1,2 encontrada por KHALID, et al., 2016; VENTURA; TINA, 2016; KURTZ; BECERRA; RILEY, 2013.

As perturbações de longa duração, no ponto comum de conexão à rede, foram incrementadas em 2% de acordo com o valor mínimo da tensão registrada. Incrementos similares na tensão de operação também são reportados na literatura, como é o caso do estudo de STETZ; YAN; e BRAUN (2010); STETZ; MARTEN; e BRAUN (2013). Em relação ao desequilíbrio de tensões, os valores máximo e mínimo diminuem em 3,5% e 70%, respectivamente; esta tendência é incongruente com os resultados do estudo de VON; BANERJEE, 2001 onde foi identificado um incremento nos mesmos.

Os harmônicos de tensão (THD) aumentaram em 7%, 0,8% e 3% nas linhas U_1 , U_2 , U_3 , respectivamente, apresentando um comportamento similar ao estudo de ELKHOLY et al., 2016, onde o aumento foi de 0,7% - 2,5% para um sistema de 8 kWp. No caso dos harmônicos de corrente, existe um incremento de 22% na linha U_1 , próximo ao incremento de 2% - 38% reportado por ELKHOLY et al., 2016. Finalmente, depois da operação da rede experimental, não foram identificadas diferenças significativas nos valores da cintilação (Flicker) de curta e longa duração, os entalhes de tensão (Notches) e as interrupções de longa duração.

As perturbações lentas não foram afetadas pela operação da rede experimental, conservando os valores das interrupções de curta duração, afundamentos de tensão (SAGS), elevações de tensão (SWELLS) e a variação da frequência.

O fator de potência não apresentou variações significativas, porém foram identificados vários incrementos como nas perturbações rápidas (66%, 45% e 37% nas linhas U_1 , U_2 , U_3 , respectivamente), a Energia ativa total (58%), a Energia reativa (17% nas linhas U_1 e U_3 , e 62,5% na linha U_2) e na Energia reativa total (42%). Estes resultados são similares aos reportados no estudo de SMITH, et al., (2011).

A partir de uma análise termográfica foi possível identificar o incremento de 7,5% na temperatura no ponto comum de conexão à rede; durante as medições, a temperatura máxima foi de 36,9 °C e a mínima de 33,7 °C. Segundo a norma NTC 2050, este incremento não representa um risco para a operação correta do sistema.

A Energia total a ser produzida na UI com a área disponível de 4.736 m² poderia ser de 643 kWh, sendo maior do que a Energia requerida de 220 kWh em horário de ponta. Se considerar as cinco (5) horas de sol pico disponíveis, a produção seria de 96,45 MWh/mês para atender a demanda de 60 MWh/mês. O excedente de 36,45 MWh/mês durante o período acadêmico e, portanto, de 66,45 MWh/mês durante o recesso, os quais podem ser comercializados com a empresa de energia da cidade.

Os custos de investimento por cada kW instalado na rede experimental (2100 USD/kWh) são menores em relação aos custos reportados em projetos internacionais de geração com sistemas fotovoltaicos (3000 – 7000 USD/kWh) (IRENA; IEA, 2013). O mesmo acontece com os custos de manutenção (22,36 USD/kWh), os quais estão por baixo do limite (25 USD/kWh) utilizado na Europa. Isto é dado pelos incentivos oferecidos pelo governo da Colômbia.

Neste projeto, o valor presente líquido (VPL) começa a ter valores positivos a partir de 6,3 anos operando com geração de 100% durante um período de 18,7 anos, diminuindo até 80,7% até chegar aos 35 anos. Se analisar as diferentes tecnologias presentes na Colômbia nos últimos dez anos e assumindo uma taxa de desconto de 12%, só quatro tecnologias apresentam um VPL positivo: as termelétricas de ciclo combinado (343,75 milhões de dólares), cogeração (46,87 milhões de dólares), hidrelétricas a fio d'água (31,25 milhões de dólares) e a fotovoltaica (0,18 milhões de dólares). Isto, sem incluir a chamada “taxa por confiabilidade”, o taxa que o governo da Colômbia exige para garantir a disponibilidade dos sistemas de geração de energia.

A taxa interna de retorno (TIR) calculada para este projeto foi de 17,8%, superior às taxas de projetos de energia geotérmica (5%), eólica (11%), hidrelétricas a fio d'água (11%) e hidrelétricas de grande porte (10%). Se utilizar este parâmetro, a energia solar fotovoltaica seria a quarta tecnologia de maior interesse para a Colômbia, já que é só ultrapassada pela cogeração (36%), as termolétricas a carvão (21%) e a gás natural (25%).

TRABALHOS FUTUROS

É necessário, realizar pesquisas sobre o comportamento da qualidade da energia, dos circuitos elétricos de baixa tensão, em instalações antigas, quando são conectados a sistemas solares fotovoltaicos.

Analisar a solução para os problemas causados pela interligação de sistemas fotovoltaicos na rede de baixa tensão.

Pesquisar os procedimentos para controle e comunicação entre os sistemas fotovoltaicos de baixa capacidade e operadores da rede.

REFERÊNCIAS

BALCELLS, J.; DOLEZAL, J.; TLUSTY, J.; VALOUCH, V. Impacts of renewable sources on power quality in distribution systems. In: ICEREPQ 04, Barcelona, 2004. 31 March–2 April, pp. 5.

BHATT, R.; CHOWDHURY, B. Grid frequency and voltage support using PV systems with energy storage. In: North American power symposium; 2011. p. 1–6.

BOUCHAKOUR, S.; CHERFA, F.; CHOUDER, A.; ABDELADIM, K.; KERKOUICHE, K. Experimental study of grid-connected photovoltaic system at CDER, Algiers. *Revue des Energies Renouvelables SIENR12 Ghardaïa*, 2012 pag 59–66.

BURGER, B., RÛTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Solar Energy* 2006 80, 32–45.

CAAMAÑO, E. Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica: Caracterización y Análisis. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones, Madrid, 1998.

CARNEIRO, J. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/16965>. [Último acceso: 1 Mayo 2015].

CELIK, B.; KARATEPE, E.; GOKMEN, N.; SILVESTRE, S. A virtual reality study of surrounding obstacles on BIPV systems for estimation of long-term performance of partially shaded PV arrays, *Science Direct*, 2013.

CHANDRASEKAR, M.; SURECH, S.; SENTHILKUMAR, T.; GANESH, M. Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures, *Science Direct*, 2013.

CHRIS, U.S. Activities, presentation at conference entitled Microgrids: Novel Architectures For Future Power Systems, Paris, Jan. 29, 2010.

COBBEN, J.F.; KLING, W.L.; MYRZIK, J.M. The making and purpose of harmonic finger prints, proceedings of 19th international conference on electricity distribution (CIRED), Vienna, Austria, 2007

COLOMBIA. Ministerio de minas y energía. Resolución 18 0466 “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE “, 2007

COLOMBIA. Ministerio de minas y energía. Resolución CREG 0024 “Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica”, 2005.

COLOMBIA. Ministerio de minas y energía. Resolución CREG 070 “Por la cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional”, 1998.

COLOMBIA. Ministerio de minas y energía. Resolución CREG 084 “Por la cual se dictan normas en materia de calidad del servicio de energía eléctrica prestado en el Sistema Interconectado Nacional”, 2002.

COLOMBIA. Ministerio de minas y energía. Resolución CREG 096 “Por la cual se dictan normas relacionadas con el Período de Transición de que trata el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, y se complementan algunas disposiciones de esas resoluciones”, 2000.

DELESPOSTE, P.H.; MELLO, M.; LYRIO, S.A. Review of the main inverter topologies applied on the integration of renewable energy resources to the grid. In: Power Electronics Conference (COBEP); 2011. p. 963–9.

DEOKAR, S.A.; WAGHMARE, L. Inducción análisis parpadeo de tensión del motor y sus medidas de mitigación utilizando dispositivos de potencia a medida: un case study, 2010.

DREWS, A.; BEYER, H.G.; RINDELHARDT, U. Quality of performance assessment of PV plants based on irradiation maps, 2008. Solar Energy 82, 1067–1075.

DUGAN, R.; MCGRANAGHAN, M.F.; SANTOSO, S. B. electrical power systems quality. H.W. segunda edición. McGraw-Hill, 2012 Pag. 8.

DUGAN, R.C.; MCGRANAGHAN, M.F.; SANTOSO, H.B. Red de energía eléctrica McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2012.

ELKHOLY, A.; FAHMY, F.H; ABOU, A.A; NAFEH, A.; SPEA, S.R. Experimental evaluation of 8 kW grid-connected photovoltaic system in Egypt. J. Electr. Syst. Inform. Technol, 2016.

FENG, S.; FANG, T.; LEI, C.; GUIYIN, F. Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic - thermal solar collector with different configurations, Science Direct, 2014.

HERNÁNDEZ, S. R.; GÓMEZ, E.; ROCHA, D. F. Evaluación del desempeño de la radiación emitida por el sol como sistema de suministro de energía a un pico-satélite CUBESAT. Revista Tecnura, 2012 (31), 19 – 32.

HIRTH, L.; ZIEGENHAGEN, I. Balancing power and variable renewables: three links. Renew Sustain Energy Rev 2015; 50:1035–51.

I.E.E.E. ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL COMMISSION, compatibilidad electromagnética (EMC) -Parte 3: Límites-Sección 3: Limitación de las fluctuaciones de tensión y flicker en redes de baja tensión para equipos con corriente de entrada ≤ 16 A, 1994.

IEC 61000 -4-7 ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 2002.

IMCO. Metodología para calcular ex ante externalidades asociadas a la generación de electricidad. México D.F, 2012: Climate Works.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview, 2013

JIANHUI, W.; YUN, S. L.; JUN, H.T.; EZRA, M. Grid-connected photovoltaic system in Malaysia: A review on voltage issues. *Renew Sustain Energy Rev* 2014, 29: 535-545

KELLER, L.; AFFOLTER, P. Optimizing the panel area of a photovoltaic system in relation to the static inverter – practical results”, *Solar Energy* 50, 1-7.

KHALID, A.; MITRA, I.; WARMUTH, W.; SCHACHT, V. «Performance ratio - Crucial parameter for grid connected PV plants,» *Science Direct*, 2016.

KURTZ, S.; BECERRA, J.; RILEY, E. Weather Corrected Performance Ratio, NREL National Renewable Energy Laboratory, 04 2013. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57991.pdf>.

LI, D.; CHEUNG, G.; LAM, J. Analysis of the operational performance and efficiency characteristic for photovoltaic system in Hong Kong,» *Science Direct*, 2005

LI, D.; CHOW, S.; LEE, E. An analysis of a medium size grid-connected building integrated photovoltaic (BIPV) system using measured data, *Science Direct*, 2013.

LOPEZ, O.; TEODORESCU, R.; FREIJEDO, F.; DOVALGANDOY, J. Leakage current evaluation of a single-phase transformerless PV inverter connected to the grid. In: 22nd annual IEEE applied power electronics conference and exposition; 2007. p. 907–12.

MACEDO, W.N., ZILLES, R. Operational results of grid-connected photovoltaic system with different inverter's sizing factors (ISF). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2007 15, 337–352.

MARTÍNEZ, G.S., GUALDA J. A. *Electrónica de Potencia*, Madrid: Copyright, 2006.

MOKHTARI, G.; NOURBAKHS, G.; ZARE, F.; GHOSH, A. Improving the penetration level of PVs using DC link for residential buildings. *Febrero de 2014*.

MONDOL, J.D.; YOHANIS, Y.G.; NOROTN, B. “Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems”, *Solar Energy* 80, 1517 – 1539.

MORA, A. J. Metodología para el análisis técnico de la masificación de los sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión (Doctoral dissertation, Doctoral Thesis),» *Universidad Nacional de Colombia, Bogotá*, 2012.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1340, “Electrotecnia y tensiones nominales en sistemas de energía eléctrica a 60 Hz en redes de servicio público”, Numeral 2.2.1., 1998.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC-5001. Calidad de la Potencia Eléctrica Límites y Metodología de Evaluación en el punto de Conexión Común. 2008.

PATIÑO, J. S.; TELLO, J. S.; HERNÁNDEZ, J. A. Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico híbrido y desarrollo de su regulador de carga aplicando instrumentación virtual,» *ELEMENTOS*, vol. 2, n° 1, pp. 29-45, 2013.

PETERS-STANLEY, M.; YIN, D. Maneuvring the Mosaic: State of the Voluntary Carbon Markets 2013. Washington, DC: Ecosystem Market Place y Bloomberg New Energy Finance.

RADZIEMSKA, E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, Science Direct, 2003.

RAHMAN, M.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency, Science Direct, 2015.

RAMPINELLI, G.; KRENZINGER, A.; ROMERO, F. Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems, Science Direct, 2014.

RETSCREEN INTERNATIONAL. Photovoltaic project analysis, PV.22. Available from: [http:// www.retscreen.net](http://www.retscreen.net):2015.

SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A.; PALYVOS, J. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting, Science Direct, 2008

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J.A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. Renewable Energy 34 (2009) 23 - 29

SMITH, J.W.; SUNDERMAN, W.; DUGAN, R.; SEAL, B. Smart inverter volt/V Ar control functions for high penetration of PV on distribution systems. In: IEEE/PES power systems conference and exposition; 2011. p. 1–6.

SONG, J. ; AN, Y. ;KIM, S. ; LEE, S. ; YOON, J. ; CHOUNG, Y. Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (BIPV), Science Direct, 2008.

STETZ, T.; MARTEN, F.; BRAUN, M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany, IEEE Trans. Sustain Energy 4 (2) (2013) 534 e 542.

STETZ, T.; YAN, W.; BRAUN, M. Voltage control in distribution systems with high level PV-penetration -improving absorption capacity for PV systems by reactive power supply, in: Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, 2010, pp. 5000 e 5006.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), «Mapas de brillo solar,» 2005. [En línea]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/3-Mapas_Brillo_Solar.pdf. [Último acceso: 15 Enero 2015].

VALLEJO, W. A.; HERNANDEZ, J.; SAENZ, E. Estudio del Recurso Solar en la Ciudad de Bogotá para el Diseño de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados Residenciales,» *Revista Colombiana de Física*, vol. 42, nº 2, p. 5, 2010.

VENTURA, C.; TINA, M. Utility scale photovoltaic plant indices and models for on-line monitoring and fault detection purposes, Science Direct, 2016.

VON, J.A.; BANERJEE, B. Assessment of voltage unbalance. IEEE Transactions on Power Delivery 2001; 16:782–90.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALMEIDA, P. M.; BARBOSA, P.G.; OLIVEIRA, J.G.; DUARTE, J.L.; RIBEIRO, P. F. Digital proportional multi-resonant current controller for improving grid-connected photovoltaic systems. *Renewable energy*, Vol. 76 Abril 2015 pages 662-669.

ANANDA, M.P, HÜSEYİN, S. Economic analysis of a grid-connected commercial photovoltaic system at Colorado State University-Pueblo, *Energy*, Volume 52, 1 April 2013, Pages 289-296.

JOHNSON, B.A. Modelling and Analysis of a PV Grid-Tied Smart Inverter's Support Function, San Luis Obispo, MSc Thesis 2013.

BENJUMEA, B.P. Energía solar para lugares apartados de la electricidad convencional. El Tiempo Santa Marta, en línea [consultado el 29 de julio de 2012], disponible en la web.<http://m.eltiempo.com/colombia/caribe/energia-solar-para-lugares-apartados-de-la-electricidad-convencional/11983892>.

DARWISH, A.; ABDEL, A.; KHALIK, A.; ELSEROUGI, S.; AHMED, A. Fault current contribution scenarios for grid-connected voltage source inverter-based distributed generation with an LCL filter,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 104, pp. 93–103, Nov. 2013.

DELPHINE, B.; TANIA, U.; JAMIE, A. Prospects and problems of increasing electricity production from mid-size renewable energy generation on the South-West Interconnected System (SWIS) in WA. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol 49 (2012) pag 57-65.

DHOPLE, S.V.; EHLMANN, J.L.; MURRAY, C.J.; CADY, S.T.; CHAPMAN, P.L. Engineering systems in the gable home, PECEI, 2010 en línea (consultado el 11 de febrero de 2013) disponible en internet.

FORMA SELECT, A. Artículo energía renovable energía solar, Escuela de negocios. Madrid España en línea consultado 5 de marzo de 2012].
<http://www.formaselect.com/areastematicas/energias-renovables/energia-solar.htm>.

GUTIÉRREZ, J.A.; FRANCO, J.F. Diseño de un sistema solar fotovoltaico de 20 kWp conectado a red. Trabajo de grado Para Ingeniero Electricista. Santiago de Cali universidad autónoma de occidente. Facultad de ingeniería 2000.217 P.

JAEHEE, L.; SUNG-KWAN, J.; KISUNG, L. Enhancement of operation efficiency of grid interconnected photovoltaic systems. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 518 (2010) pag. 6564-6566.

KEN, W. K.; YEE, W. W.; RAJPARTHIBAN, K. R. Power Quality Analysis for PV Grid Connected System Using PSCAD/EMTDC. *International journal of renewable energy research. IJRER*. Vol 5 N| 1 (2015).

KEVIN, A. K.; SUNDARESWARAN, K. Performance study on a grid connected 20 kW_p solar photovoltaic installations in an industry in Tiruchirappalli (India). November of 2014.

MACEDO, M.N.; GALO, J.J.; ALMEIDA, L.A.; LIMA, A.C. Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment. *Electrical Power and Energy Systems* Vol .41 (2015) pag 128-133.

MAKBUL, R.; AYONG, H.; KHALED, S.; SSENNOGA, T. Optimal sizing of grid-connected photovoltaic energy system in Saudi Arabia. *Renewable energy*, Volume 75, March 2015, Pages 489–495.

MARCO, B.; MAURO, G.; ALESSANDRO, G.; CRISTINA, M.; ALBERTO, R. Multiparameter analysis for the technical and economic assessment of photovoltaic systems in the main. May of 2014.

MOHAMMAD, B. L.; AHMET, Teke. Investigation of multilevel multifunctional grid connected inverter topologies and control strategies used in photovoltaic systems. *Renewable and sustainable energy Reviews*, Volume 42, February 2015, Pages 361–376.

NATTAPOL, S.; ISSARACHAI, N. Intelligent photovoltaic farms for robust frequency stabilization in multi-area interconnected power system based on PSO-based optimal sugeno fuzzy logic control. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol . 74. (2015) pp 555-567.

NIRMAL, Kumar. Smart Grid: Future networks for New Zealand power systems incorporating distributed generation. En líneas ciencedirect.com. consulta: 10 Febrero. 2011.

REDDY, M. K.; MALLICK, H.; SHARON, S. L. A review of Integration, Control, Communication and Metering (ICCM) of renewable energy based smart grid. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 38 (2014) pag 180-192.

ROY, A.; KABIR, M.A. Effect of inflation, subsidizing and market pricing on the relative cost performance of solar PV and fossil fuel based power sources, Enero. 2012 en línea [consultado el 11 de febrero de 2013] disponible en internet.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6153437&isnumber=6153424>.

SENSSTECH SOLUCIONES S.A.S. información de proyectos realizados en la trayectoria de la empresa; en línea [información consultada el 30 de marzo de 2013] disponible en la web: <http://www.sensstech.com>.

SHIMY, M. Stability based minimization of load shedding in weakly interconnected systems for real-time applications. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol 70 (2015) pag. 99-107.

SIRIPATRODOM, P. The biggest solar home system, photovoltaic energy conversion conferencia IEEE mayo 2006.enlínea [consultada el 11 de Febrero de 2013].

TOSHIHIRO, M.; SHISHIN, K.; YUZURU, U.; MIKI, S.; NAOYA, A. Residential PV system users' perception of profitability, reliability, and failure risk: An empirical survey in a local Japanese municipality, *Energy Policy*, Volume 39, Issue 9, September 2011, Pages 5440-5448.

TSANG, W.L. Chan Rapid islanding detection using multi-level inverter for grid-interactive PV system *Energy Convers Manage*, 77 (2014), pp. 278–286.

TSILINGIRIDIS, G.; IKONOMOPOULOS, A. First results of incentives policy on grid interconnected photovoltaic systems development in Greece. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol 58 (2013) pag 303-311.

VIKRANT, S.; CHANDEL, S.S. Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India. Abril de 2013.

Wong, J., LIM, Y. S. Morris. Grid-connected photovoltaic system in Malaysia: A review on voltage issues,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 535–545, Jan. 2014.

XIANGNING, L.; RUI, Z.; NING, Tong.; XIANSHAN, Li.; MING, Li.; DEXIAN, Yang. Regional protection scheme designed for low-voltage micro-grids. Agosto de 2014.

YANAN, Z.; ZHAO GUANG, H.; JIANHUI, W.; QUAN, W. *IRSP* (integrated resource strategic planning) with interconnected smart grids in integrating renewable energy and implementing DSM (demand side management) in China. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 76, (2014) pp 863 – 874.

YANG, L.; WENYING, W. A Survey on Problems in Smart Grid with Large Capacity Wind Farm Interconnected. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 17 (2012) pag. 776 -782.

YONG, L.; FANG, L.; YIJIA, C. Delay-dependent wide-area damping control for stability enhancement of HVDC/AC interconnected power systems. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 37 (2015) pag 43-54.

RESULTADOS OBTIDOS

O estudo sobre a “Implementação de uma rede experimental de geração distribuída (GD) com energia solar: estudo de caso da universidade de Ibagué – Colômbia” produziu os seguintes resultados:

A realização do trabalho de graduação em engenharia Mecânica, de três estudantes, na forma de assistentes de pesquisa.

Apresentação do artigo “Implementação de uma rede experimental de geração distribuída (GD) com energia solar: estudo de caso da universidade de Ibagué – Colômbia” na IX Conferência Científica Internacional de Engenharia Mecânica. Organizado pela Faculdade de Ingeniería Mecánica e Industrial, UCLV, Cuba e Ministerio de Educación Superior, Otto – von – Guericke Universität, Magdeburg, Alemanha.

Publicação do artigo “Implementação de uma rede experimental de geração distribuída (GD) com energia solar: estudo de caso da universidade de Ibagué – Colômbia” nas memórias do evento.

Inscrição do artigo “Estudo de qualidade de energia no ponto comum de uma rede de energia de baixa tensão e um sistema de geração distribuída de 7,8 kWp, em uma região tropical” na XIII Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, CIBEM 2017. Organizado pela Federação Iberoamericana de Engenharia Mecânica, em Lisboa, Portugal, do 23-26 de Outubro de 2017. Foi aceito no dia 5 de Abril 2017.

Envio do documento intitulado “Estudo de qualidade de energia no ponto comum de uma rede de energia de baixa tensão e um sistema de geração distribuída de 7,8 kWp, em uma região tropical” a ser publicado na Revista Ibero-americana de Engenharia Mecânica.

Envio do documento intitulado “Estudo da qualidade da energia no ponto comum de conexão entre uma rede de baixa tensão e um sistema fotovoltaico de 7,8 kWp” a ser publicado na Revista Ingeniería y Competitividad da Universidade do Valle, Colômbia.

Envio do documento intitulado “PRACTICAL METHOD FOR THE DESIGN OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS” a ser publicado na Revista DYNA da Faculdade de Minas, Universidad Nacional de Colômbia.

Envio do documento intitulado “Performance analysis of a 7.8 kWp photovoltaic solar system connected to a low voltage network in the Colombian Andean region” a ser publicado na Revista Energy for Sustainable Development.

ANEXO A

Tabela 1 - Dados coletados das medições na rede experimental durante o mês de fevereiro de 2016.

Fecha	Hora	Tensão CC (V)			Amperagem CC (A)			Tensão CA (V)			Amperagem CA		Radiação Solar	Temp. A.	Va	Tem. Painel
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	L1	L1-L3	L3	L1	L3	(W/m ²)	(°C)	m/s	(°C)
24-Feb	10:00	297,14	296,86	308,30	1,47	1,47	1,41	111,70	203,66	114,24	5,55	5,65	149,44	25,82	0,57	23,34
	11:00	300,82	299,58	311,08	2,78	2,79	2,69	109,44	204,20	112,12	11,10	10,79	234,34	29,30	0,19	26,42
	12:00	294,50	293,86	306,54	3,87	3,88	3,71	111,62	209,04	112,92	14,54	14,88	334,48	28,88	0,25	27,98
	13:00	284,90	286,62	293,66	5,25	5,22	5,09	109,44	211,00	112,98	19,90	19,13	491,22	29,70	0,52	32,58
	14:00	285,68	285,58	290,40	3,03	3,03	2,98	107,76	206,06	90,74	12,95	12,29	306,04	30,10	0,73	30,28
	15:00	286,86	287,92	298,12	1,60	1,59	1,54	104,76	202,20	109,72	6,21	6,21	184,16	29,48	0,19	28,08
25-Feb	16:00	293,16	292,62	296,58	2,42	2,42	2,39	105,40	181,98	109,88	8,47	10,60	507,24	28,46	0,25	31,12
	10:00	273,38	275,46	286,90	5,86	5,81	5,58	111,54	208,64	113,84	20,17	21,03	604,90	27,70	0,62	28,80
	11:00	282,06	280,46	286,18	1,59	1,60	1,57	111,70	211,80	115,14	5,72	5,78	535,58	30,40	0,68	31,84
	12:00	283,08	283,36	287,20	1,46	1,46	1,44	109,18	206,08	111,30	5,09	5,79	121,14	29,06	0,90	26,72
	15:00	299,12	299,28	293,34	2,62	2,62	2,67	111,22	205,10	114,68	10,16	9,99	207,68	26,50	0,30	26,20
	16:00	293,26	292,06	284,52	2,28	2,28	2,35	111,46	204,56	113,20	7,83	9,39	258,40	26,46	0,33	25,70
26-Feb	10:00	298,32	297,40	308,38	2,64	2,65	2,55	113,54	205,40	114,88	9,95	10,05	215,00	27,68	0,08	25,88
	11:00	290,40	288,98	298,42	5,26	5,29	5,12	114,24	208,28	115,60	19,50	19,10	524,44	31,76	0,70	28,64
	12:00	290,34	291,12	302,00	2,70	2,69	2,60	114,08	209,12	114,26	9,88	10,05	268,40	29,74	0,21	28,32
	13:00	289,78	289,90	303,38	2,24	2,24	2,14	112,24	209,36	113,44	8,39	8,28	241,74	28,90	0,22	28,78
	14:00	294,08	295,36	312,54	3,01	2,99	2,83	110,94	209,40	113,06	11,88	11,02	307,08	31,54	0,12	29,56
	15:00	285,14	283,92	290,30	5,49	5,52	5,39	109,58	208,50	113,26	19,86	20,90	839,10	33,26	0,55	34,24
27-Feb	16:00	292,14	297,56	277,86	1,31	1,29	1,38	109,42	205,46	111,62	5,14	4,94	99,26	29,14	0,27	27,24
	10:00	279,22	279,28	285,88	3,72	3,72	3,64	108,42	206,58	110,12	13,16	14,42	915,20	29,04	0,36	30,00
	11:00	273,54	272,76	278,74	4,18	4,19	4,10	108,12	205,04	110,64	16,36	13,96	290,80	31,12	0,70	30,78
	12:00	278,34	274,64	287,88	4,53	4,59	4,38	112,82	213,96	115,60	14,14	17,81	487,40	32,02	0,74	33,94
	13:00	267,80	268,04	278,38	8,46	8,45	8,14	110,96	207,56	112,50	29,53	29,29	1004,40	35,82	0,53	35,38
	14:00	277,70	276,48	281,58	4,44	4,46	4,38	112,06	208,74	113,06	19,90	11,89	407,20	33,72	0,37	31,56
29-Feb	15:00	283,62	280,30	293,40	1,77	1,79	1,71	110,92	206,60	112,10	6,91	6,12	345,38	34,02	0,26	32,54
	16:00	256,30	258,40	281,70	3,19	3,17	2,90	112,94	210,46	113,60	10,52	10,43	473,00	31,22	0,47	32,62
	10:00	267,48	267,64	267,74	7,36	7,35	7,35	111,32	211,60	113,34	25,43	25,38	865,20	26,30	0,43	29,38
	11:00	259,20	259,74	259,10	8,34	8,32	8,34	109,60	211,24	112,88	28,32	28,07	919,80	31,12	0,73	28,88
	12:00	256,16	257,18	248,84	7,52	7,49	7,74	111,24	212,02	113,64	25,32	24,38	832,60	30,88	0,86	32,48
	13:00	256,32	259,68	235,46	8,20	8,09	8,92	113,64	214,94	113,80	26,72	26,87	953,60	33,92	0,19	35,06
29-Feb	14:00	259,46	260,12	222,94	3,47	3,46	4,04	110,88	211,48	113,12	12,31	11,01	1079,00	34,76	0,83	36,88
	15:00	279,22	279,58	259,88	4,42	4,41	4,75	107,88	206,52	112,66	13,62	18,73	197,60	32,68	0,42	33,06
29-Feb	16:00	271,16	271,36	291,72	3,18	3,18	2,96	108,34	204,96	111,66	11,13	11,60	516,20	32,00	0,54	32,22

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 - Dados coletados das medições na rede experimental durante a primeira parte do mês de Março de 2016.

Data	Hora	Tensão CC (V)			Amperagem CC (A)			Tensão CA (V)			Amperagem CA		Radiação Solar	Temp. A.	Va	Tem. Painel
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	L1	L1-L3	L3	L1	L3	(W/m ²)	(°C)	m/s	(°C)
01-Mar	10:00	279,84	277,86	279,72	4,65	4,68	4,65	107,54	207,20	111,42	16,95	17,51	337,40	27,24	0,30	29,20
	11:00	280,72	280,04	281,16	5,77	5,78	5,76	108,86	208,54	111,88	21,74	20,82	313,20	29,16	0,89	29,36
	12:00	279,86	279,08	287,76	1,94	1,95	1,89	111,28	212,24	114,00	7,01	7,00	217,80	30,04	0,25	30,08
	13:00	275,88	275,14	284,28	4,98	5,00	4,84	110,20	209,22	112,22	18,08	17,79	561,40	31,20	0,51	33,14
	14:00	273,54	273,58	297,80	4,31	4,30	3,95	108,90	208,40	111,74	15,67	15,31	482,20	31,84	0,64	32,08
	15:00	280,74	281,16	288,58	2,68	2,68	2,61	108,08	205,40	111,22	10,81	9,13	213,60	30,08	0,57	29,46
	16:00	282,78	283,28	293,24	1,16	1,16	1,12	107,98	203,84	109,78	4,40	4,35	102,62	29,94	0,34	28,56
	10:00	292,90	293,90	301,40	3,10	3,09	3,01	108,98	210,36	111,78	12,47	11,41	235,40	26,72	0,43	27,14
	11:00	283,80	282,64	296,08	2,41	2,42	2,31	108,02	206,82	109,84	9,30	8,90	210,60	29,32	0,34	27,94
02-Mar	12:00	281,60	281,36	289,16	1,11	1,11	1,08	108,14	204,42	109,14	4,18	4,16	102,24	27,22	0,19	26,72
	10:00	287,82	287,94	299,72	3,62	3,62	3,48	106,54	205,40	109,18	13,38	14,64	372,00	29,92	0,15	29,92
	11:00	291,78	291,88	299,52	3,08	3,08	3,00	108,94	207,32	111,34	12,81	10,90	224,20	28,88	0,49	28,72
	12:00	286,14	283,88	293,18	3,39	3,42	3,31	110,52	210,04	112,80	13,15	12,08	357,80	30,96	0,57	30,92
	13:00	269,92	269,08	268,70	7,20	7,23	7,24	111,24	211,70	113,31	27,32	22,96	1029,20	32,16	0,66	34,12
	14:00	278,26	280,68	277,94	3,72	3,68	3,72	107,40	203,58	110,44	13,14	14,38	119,76	29,72	0,48	30,44
	15:00	282,90	278,90	286,76	1,04	1,06	1,03	108,36	204,90	110,96	4,13	3,69	148,80	28,72	1,23	29,40
	16:00	297,28	293,32	311,38	2,48	2,51	2,37	110,54	207,08	112,36	9,55	9,63	644,00	26,36	0,82	26,90
	11:00	272,56	276,56	285,84	5,96	5,87	5,68	101,62	211,22	103,18	22,20	23,82	429,40	26,28	0,66	28,10
03-Mar	12:00	274,28	275,44	286,54	3,85	3,84	3,69	108,88	214,34	112,42	13,56	14,14	420,00	28,98	0,41	30,06
	13:00	276,20	276,20	290,40	4,03	4,03	3,83	109,06	210,06	111,24	14,92	14,40	420,60	31,12	0,30	30,88
	14:00	268,04	268,30	223,60	6,61	6,60	7,92	107,08	208,00	110,50	23,08	24,15	992,00	31,26	0,60	33,40
	15:00	276,96	278,64	271,64	2,25	2,23	2,29	108,40	207,50	112,26	8,69	7,69	629,00	30,22	0,68	33,02
	16:00	282,78	282,20	286,76	2,62	2,62	2,58	108,72	205,42	111,20	9,36	10,15	169,20	30,06	0,53	30,18
	10:00	276,70	274,42	277,42	6,85	6,91	6,84	107,12	208,54	112,20	29,38	20,99	391,40	27,26	0,37	29,82
	11:00	283,26	283,86	286,44	6,05	6,04	5,98	105,68	203,18	110,14	23,86	22,25	185,60	28,48	0,84	28,44
	12:00	274,62	277,86	276,38	6,11	6,03	6,07	109,38	208,36	110,76	22,85	21,35	547,20	28,50	0,72	30,66
	13:00	262,50	263,98	207,30	7,41	7,37	9,39	110,84	212,06	112,94	24,76	25,68	811,20	32,86	0,46	33,54
07-Mar	14:00	272,14	273,54	280,12	2,58	2,56	2,50	106,76	204,50	110,36	9,20	9,54	863,60	33,08	0,27	33,36
	15:00	286,28	288,20	287,22	4,84	4,81	4,83	106,60	205,26	111,02	18,67	18,31	755,00	29,48	0,68	30,14
	16:00	286,92	286,54	289,06	2,23	2,23	2,21	106,92	203,22	109,60	8,70	8,44	282,60	29,86	0,59	31,80
	10:00	278,78	279,76	281,92	2,70	2,69	2,67	103,66	204,76	109,28	10,25	10,28	214,80	25,82	0,61	27,98
	11:00	277,90	278,26	286,18	2,13	2,13	2,07	104,90	203,32	109,06	8,24	7,85	163,08	27,82	0,47	27,52
	12:00	260,30	261,46	247,76	5,91	5,88	6,21	110,16	214,24	113,88	23,99	15,96	951,40	31,28	0,35	32,64
	13:00	268,64	267,74	304,48	6,09	6,11	5,37	110,02	213,56	114,22	20,18	22,12	797,00	33,04	0,25	32,32
	14:00	273,70	271,44	281,46	3,14	3,17	3,06	107,00	205,22	110,08	11,18	11,81	430,00	30,80	0,56	33,70
	15:00	279,46	279,30	287,22	2,79	2,79	2,71	107,22	204,04	109,80	9,90	10,93	453,40	31,58	0,59	33,08
08-Mar	16:00	283,70	281,62	282,02	0,76	0,76	0,76	106,80	202,62	108,56	2,94	2,85	118,98	29,96	0,34	30,82
	10:00	282,34	282,10	282,34	6,63	6,64	6,63	106,02	211,00	111,84	24,48	25,35	446,80	25,66	0,44	26,88
	11:00	259,98	259,54	261,16	8,12	8,14	8,09	107,38	213,06	112,98	27,47	28,13	974,40	29,98	0,30	32,96
	12:00	267,60	271,90	274,04	3,51	3,45	3,42	107,66	210,96	112,86	12,39	12,29	272,40	30,26	0,50	31,96
	13:00	279,48	279,42	284,64	1,50	1,50	1,47	106,70	206,58	111,86	5,59	5,55	168,58	29,70	0,64	30,58
	14:00	272,82	271,78	215,50	4,89	4,90	6,19	107,78	211,92	113,00	17,29	17,73	813,00	28,42	0,33	31,80
	15:00	275,86	277,28	287,78	1,01	1,01	0,97	105,46	202,52	110,22	3,74	3,76	106,70	30,16	0,35	30,40
	16:00	293,76	293,58	294,22	1,45	1,45	1,45	109,06	206,04	110,44	5,78	5,47	185,90	29,72	0,00	29,06
	10:00	263,72	263,80	263,84	6,84	6,84	6,84	109,64	212,00	111,88	22,50	24,74	928,40	27,72	0,91	31,08
09-Mar	11:00	262,32	261,42	260,44	8,66	8,69	8,72	106,98	205,38	109,88	29,77	30,99	999,20	30,80	0,89	34,18
	12:00	274,70	275,34	285,22	5,69	5,68	5,48	109,94	209,78	112,24	20,30	20,54	456,60	31,30	0,46	32,48
	13:00	264,30	265,90	280,14	3,22	3,20	3,04	110,84	209,50	111,54	11,30	10,88	271,40	31,88	0,54	34,76
	14:00	274,70	274,32	216,98	5,94	5,95	7,52	108,72	206,04	110,30	21,68	21,57	809,60	30,10	0,40	33,48
	15:00	283,48	282,64	302,04	1,84	1,84	1,73	107,82	203,82	109,26	7,24	6,70	237,40	29,16	0,45	29,92
	16:00	287,52	288,52	295,86	0,63	0,63	0,61	107,54	202,32	108,40	2,49	2,37	152,78	30,46	0,26	31,08

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 - Dados coletados das medições na rede experimental durante o mês de Junho de 2016.

Data	Hora	Tensão CC (V)			Amperagem CC (A)			Tensão CA (V)			Amperagem CA		Radiação Solar	Temp. A.	Va	Tem. Painel
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	L1	L1-L3	L3	L1	L3	(W/m ²)	(°C)	m/s	(°C)
01-Jun	10:00	285,16	285,48	298,20	5,14	4,73	4,90	109,06	209,58	109,48	16,62	16,48	490,00	23,96	1,10	34,24
	11:00	286,52	286,20	291,36	5,49	4,23	5,03	109,08	209,28	109,32	13,50	13,30	329,60	26,62	0,46	30,86
	12:00	283,40	282,98	297,22	5,43	4,34	5,06	110,12	210,74	110,68	16,94	16,76	399,40	28,24	0,80	34,36
	13:00	271,84	269,64	303,42	6,31	3,64	4,40	110,14	210,04	110,42	14,64	14,37	926,40	32,26	0,08	34,12
	14:00	279,94	281,04	305,88	3,14	1,66	3,48	107,76	206,16	109,16	6,02	6,05	294,00	32,18	1,45	30,60
	15:00	282,16	281,72	293,68	3,10	2,36	3,07	107,48	205,38	108,38	8,43	8,26	217,20	32,84	1,07	31,22
	16:00	275,22	273,24	274,02	2,14	1,93	2,06	107,04	204,14	107,46	2,83	2,86	148,00	31,38	0,06	28,32
02-Jun	10:00	284,88	285,36	294,02	4,32	3,75	8,21	105,94	207,60	107,92	8,83	8,73	227,20	24,24	0,51	31,00
	11:00	264,40	254,30	310,26	5,49	4,20	5,03	109,80	212,66	107,10	22,53	22,49	416,20	28,46	1,22	33,58
	12:00	279,10	285,92	300,82	5,43	4,43	5,06	110,04	213,14	109,76	15,37	15,51	469,80	31,46	0,37	35,44
	13:00	275,20	276,54	284,40	4,67	3,62	4,53	109,52	209,96	109,66	10,29	10,50	315,60	31,86	1,07	33,54
	14:00	266,48	279,00	306,88	9,67	3,55	9,13	110,06	213,36	110,78	20,87	19,70	917,20	31,08	0,68	32,96
	15:00	280,20	278,98	289,96	2,92	2,62	2,82	107,60	206,90	109,88	7,28	7,14	281,60	32,48	1,14	29,26
	16:00	286,20	286,86	294,92	2,14	2,00	2,06	108,46	207,26	109,80	4,11	4,10	112,40	27,76	1,20	25,10
03-Jun	10:00	304,38	299,70	311,08	5,14	4,64	4,90	108,86	210,84	108,88	18,20	17,44	354,20	24,24	0,55	35,58
	11:00	281,14	282,68	296,18	5,48	4,56	5,01	108,90	210,14	109,58	16,06	16,06	419,00	28,38	0,06	33,78
	12:00	284,28	284,98	295,20	4,85	3,82	4,62	109,20	172,20	109,60	11,89	11,75	344,20	30,74	1,03	32,20
	13:00	288,30	287,42	304,46	4,67	3,69	4,53	109,54	209,86	109,94	8,31	8,31	360,00	28,54	0,90	31,38
	14:00	287,50	284,36	297,76	3,94	3,32	3,85	109,28	209,76	109,80	11,03	10,77	400,00	30,50	0,00	31,66
	15:00	282,82	282,54	294,08	2,92	2,12	2,82	108,76	207,10	108,76	5,95	5,91	172,80	32,38	0,20	30,14
	16:00	287,36	286,78	298,08	2,14	2,04	2,06	107,10	206,50	108,14	3,25	3,30	125,40	29,16	0,06	27,20
04-Jun	10:00	189,22	191,54	311,02	8,63	3,19	6,23	109,00	210,42	109,94	14,55	14,31	895,60	25,12	0,14	40,78
	11:00	274,74	274,46	301,54	6,96	2,91	6,11	109,86	212,44	109,90	17,44	16,07	1033,20	30,84	0,67	43,08
	12:00	286,56	286,40	303,36	4,48	2,84	4,19	107,22	207,74	108,70	10,77	10,83	419,00	29,64	1,75	31,82
	13:00	266,88	264,22	328,26	8,19	0,95	7,16	108,54	209,86	110,32	14,62	15,89	933,00	28,28	0,60	30,50
	14:00	231,72	234,06	184,06	5,65	1,88	4,07	109,62	210,64	111,72	16,76	16,11	792,00	30,16	1,51	30,56
	15:00	262,28	262,80	238,86	1,06	4,56	4,81	110,64	210,84	112,58	9,46	9,39	595,40	30,66	1,46	34,20
	16:00	298,58	294,82	303,16	2,14	1,98	2,06	110,16	208,26	110,54	3,18	2,97	116,00	30,98	1,01	30,16
08-Jun	10:00	178,74	182,10	310,70	8,92	2,39	2,83	107,20	209,34	106,18	11,96	11,94	860,60	24,80	0,48	39,68
	11:00	153,06	154,90	300,08	8,41	1,31	2,75	107,22	209,32	107,94	11,06	11,19	935,00	31,02	0,97	44,54
	12:00	163,22	163,98	304,60	8,38	0,95	2,78	107,66	210,10	109,20	11,59	11,05	970,80	32,20	0,93	28,88
	13:00	200,60	195,12	318,02	8,05	1,12	3,06	108,50	212,20	110,98	15,17	10,59	999,80	32,48	0,64	28,44
	14:00	233,78	233,58	298,58	3,25	2,14	2,68	107,90	208,82	109,18	10,80	10,59	425,00	37,60	0,56	33,16
	15:00	275,90	261,22	310,62	2,14	1,68	1,37	107,82	207,90	108,56	5,78	5,65	260,40	35,58	0,12	31,06
	16:00	258,84	246,96	250,90	1,27	3,13	1,39	107,62	207,62	108,76	5,87	3,49	403,80	36,94	0,96	30,04
11-Jun	10:00	177,96	171,10	305,64	8,67	1,95	2,86	107,56	210,02	108,78	11,52	11,93	846,40	28,64	1,72	42,88
	11:00	266,64	268,98	302,70	8,22	1,14	2,65	106,92	208,54	108,70	10,87	10,72	995,00	34,98	0,53	42,54
	12:00	264,22	265,32	300,70	8,08	1,10	2,68	107,46	208,44	108,40	10,90	10,79	1032,80	32,68	0,96	30,14
	13:00	219,60	209,00	164,18	7,96	1,06	8,37	107,94	207,18	108,54	18,82	18,01	949,60	30,74	1,38	27,72
	14:00	229,28	234,38	184,94	6,30	6,30	6,99	110,46	212,24	111,48	17,13	16,67	863,40	32,54	0,35	30,48
	15:00	285,76	289,66	305,36	2,31	2,66	1,64	108,74	208,42	109,82	6,79	6,53	231,20	32,56	0,00	32,12
	16:00	291,12	292,74	268,86	1,14	1,20	0,65	108,78	207,98	109,72	2,38	2,30	288,20	31,04	0,30	27,88

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 8 - Dados coletados das medições na rede experimental durante o mês de Agosto de 2016.

Data	Hora	Tensão CC (V)			Amperagem CC (A)			Tensão CA (V)			Amperagem CA		Radiação Solar	Temp. A.	Va	Tem. Painel
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	L1	L1-L3	L3	L1	L3	(W/m ²)	(°C)	m/s	(°C)
02-Ago	10:00	271,36	270,30	303,84	6,86	3,67	6,93	105,16	208,46	105,46	14,36	13,52	630,40	28,36	0,99	35,82
	11:00	251,28	236,30	308,58	8,44	2,16	7,64	105,52	209,90	106,46	20,38	20,30	1112,20	36,96	1,11	36,52
	12:00	269,50	271,22	288,14	5,88	3,97	5,82	105,26	208,30	106,50	13,41	13,40	781,20	37,88	0,21	40,28
	13:00	280,42	280,18	302,64	8,02	3,53	5,32	107,40	210,52	107,24	12,85	12,84	657,20	36,82	0,99	37,24
	14:00	283,10	283,02	293,48	2,71	2,34	2,63	104,00	204,48	105,18	9,20	9,06	264,80	35,42	1,04	32,26
	15:00	284,76	284,00	295,38	2,94	2,34	2,74	104,72	205,32	104,72	6,91	6,79	268,20	32,64	1,07	29,98
	16:00	277,98	283,50	295,26	1,91	1,66	1,78	104,54	204,28	104,72	3,90	3,83	116,20	30,92	0,60	28,22
	10:00	277,38	272,52	308,60	7,87	5,07	8,13	104,44	209,12	106,54	21,49	21,58	818,60	32,78	0,62	36,70
03-Ago	11:00	270,16	270,96	295,36	6,69	4,49	7,01	104,56	207,26	105,06	15,27	15,13	654,60	35,78	0,71	39,88
	12:00	287,68	284,44	301,56	4,85	3,79	4,62	104,60	208,28	106,44	16,88	16,59	473,00	37,76	0,12	33,64
	13:00	282,94	285,40	305,14	4,67	3,84	4,53	106,56	211,40	107,98	15,94	14,78	441,60	35,92	0,73	33,78
	14:00	279,92	279,48	292,34	3,94	3,19	3,85	104,42	204,52	104,54	8,64	8,63	395,40	36,26	0,43	35,18
	15:00	283,56	285,14	293,40	2,95	2,49	2,82	104,76	203,86	103,56	7,00	6,95	217,00	34,38	0,20	29,84
	16:00	301,90	299,66	274,32	1,76	1,57	1,74	102,94	202,14	103,22	4,54	4,37	110,00	30,60	0,40	27,58
	10:00	259,12	262,96	313,14	9,07	2,33	8,77	104,60	207,82	106,20	18,97	18,50	955,40	28,02	0,34	42,58
	11:00	275,60	275,90	293,14	5,49	4,20	5,03	104,66	205,50	105,24	12,26	12,08	443,80	37,56	0,48	36,74
04-Ago	12:00	283,40	282,56	301,26	4,48	3,46	4,19	107,40	210,02	107,06	14,35	14,22	411,80	35,58	0,78	35,54
	13:00	265,22	264,60	306,16	6,31	3,31	4,40	107,62	209,94	106,46	16,15	15,82	727,20	34,20	0,78	36,62
	14:00	249,60	249,76	322,96	3,14	2,15	3,48	105,12	207,48	105,58	15,76	16,05	497,80	32,42	0,98	35,16
	15:00	281,12	279,32	294,68	2,92	2,17	2,82	103,40	203,48	104,62	8,98	8,96	345,60	31,86	0,84	32,80
	16:00	279,84	280,00	289,02	1,86	1,71	1,82	104,72	203,12	103,88	5,17	5,18	122,60	31,30	0,94	30,38
	10:00	265,86	268,20	81,90	7,93	7,96	8,00	104,96	210,00	105,66	20,46	20,46	759,40	28,40	1,28	37,74
	11:00	260,40	263,52	81,10	5,20	6,13	8,20	103,82	209,72	106,26	21,58	21,29	1073,60	34,18	0,64	37,44
	12:00	197,72	190,04	118,12	7,25	7,17	4,25	105,34	210,88	106,88	15,93	15,94	869,00	30,72	2,04	39,48
09-Ago	13:00	250,56	241,14	178,36	7,21	6,66	6,26	106,38	208,62	104,66	7,91	7,69	844,00	32,42	2,00	39,88
	14:00	232,72	246,14	176,60	7,22	6,86	6,86	101,88	203,80	104,78	14,34	16,02	698,60	31,62	1,60	40,70
	15:00	266,08	274,80	212,58	3,07	3,60	4,00	101,30	201,92	103,52	9,43	8,26	489,60	36,32	0,42	33,82
	16:00	278,48	278,48	290,04	2,15	1,90	2,37	103,56	202,18	103,56	5,75	5,56	228,00	31,26	1,38	32,02
	10:00	271,86	259,84	302,04	7,75	4,56	6,81	102,72	209,66	106,28	21,57	24,66	638,40	28,78	1,12	34,22
	11:00	278,30	276,58	307,38	5,26	3,56	4,78	103,70	207,74	105,36	22,25	22,58	442,00	30,62	1,32	36,10
	12:00	186,84	185,16	309,22	7,69	3,13	4,55	104,76	208,26	104,96	13,23	11,97	841,60	31,22	1,20	39,88
	13:00	227,66	218,02	307,46	6,87	2,51	5,54	106,50	208,92	105,20	25,02	22,51	716,20	35,50	0,78	45,24
10-Ago	14:00	273,10	252,66	317,70	8,67	1,66	7,31	105,18	206,92	105,06	10,79	9,25	999,60	33,24	0,74	45,16
	15:00	226,28	278,14	224,18	2,61	2,60	3,01	103,16	202,06	103,40	6,81	6,76	285,80	35,14	0,30	32,88
	16:00	292,68	292,20	235,66	2,09	1,99	2,13	102,94	201,90	102,96	5,46	5,27	223,20	32,78	2,54	32,18
	10:00	276,36	277,14	289,74	6,45	4,92	7,02	104,42	207,40	103,80	19,62	18,61	523,80	27,92	1,88	36,94
	11:00	280,78	281,10	305,30	4,80	3,69	5,12	104,42	208,10	104,30	13,96	13,78	492,20	31,50	0,86	35,70
	12:00	280,98	279,82	308,46	4,33	3,54	4,21	106,38	211,60	106,22	15,69	15,31	400,40	32,16	1,30	38,86
	13:00	285,78	276,64	300,46	3,90	2,23	2,97	105,24	206,96	105,16	11,75	11,30	507,00	33,78	0,60	40,42
	14:00	271,30	267,06	311,66	3,41	2,50	3,20	103,00	203,98	104,40	9,55	9,36	478,60	32,00	0,94	34,04
11-Ago	15:00	287,52	289,54	256,16	2,05	1,66	2,25	101,58	200,72	102,30	6,22	6,32	216,00	34,28	0,22	30,34
	16:00	292,08	292,48	188,22	1,26	3,72	1,36	102,42	201,54	102,94	4,15	4,15	414,60	32,54	0,58	31,80
	10:00	264,56	266,42	78,62	4,32	2,88	8,21	103,76	209,92	106,18	22,08	21,91	405,80	26,88	0,54	40,40
	11:00	244,90	251,74	306,06	9,63	2,95	9,29	104,24	209,52	105,74	24,30	23,62	1115,80	29,14	1,50	42,86
	12:00	272,70	272,02	280,48	2,89	2,80	2,84	105,22	209,32	104,64	6,63	6,49	264,20	34,40	0,26	38,56
	13:00	233,68	237,80	315,46	8,19	1,22	7,16	104,06	205,02	104,00	17,92	17,00	1019,00	36,52	0,42	42,12
	14:00	249,20	248,96	308,78	6,38	0,69	6,19	105,74	210,38	106,36	17,46	17,32	911,00	35,62	0,88	43,54
	15:00	256,82	251,60	193,26	5,08	4,86	4,39	103,00	205,80	105,08	17,18	16,79	744,40	35,04	0,38	40,02
16:00	278,22	276,18	224,50	2,97	3,03	3,10	102,86	204,32	104,94	13,16	13,08	497,60	32,24	1,22	33,98	

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 9 - Parâmetros característicos Y_F , Y_R e P_R da rede experimental no período de estudo.

Dia	kWh/dia	YF	YR	PR
24-Feb	17,110	2,194	3,783	0,580
25-Feb	18,540	2,377	3,286	0,723
26-Feb	17,170	2,201	4,277	0,515
27-Feb	27,680	3,549	6,726	0,528
29-Feb	34,710	4,450	9,195	0,484
01-Mar	28,490	3,653	3,820	0,956
02-Mar	26,150	3,353	2,193	0,960
03-Mar	31,920	4,092	4,964	0,824
04-Mar	11,000	1,410	5,374	0,262
07-Mar	31,520	4,041	6,577	0,614
08-Mar	34,350	4,404	5,363	0,821
09-Mar	14,910	1,912	5,088	0,376
10-Mar	17,460	2,238	6,609	0,339
11-Mar	27,330	3,504	5,830	0,601
12-Mar	10,010	1,283	5,055	0,254
14-Mar	27,020	3,464	4,150	0,835
15-Mar	25,190	3,229	6,904	0,468
18-Mar	27,580	3,536	5,729	0,617
19-Mar	28,570	3,663	7,346	0,499
28-Mar	35,890	4,601	10,003	0,460
29-Mar	23,040	2,954	5,180	0,570
30-Mar	26,240	3,364	5,053	0,666
02-Abr	11,270	1,445	1,681	0,859
04-Abr	11,000	1,410	1,747	0,807
05-Abr	27,520	3,528	5,272	0,669
07-Abr	31,520	4,041	5,472	0,739
08-Abr	34,350	4,404	11,268	0,391
09-Abr	14,910	1,912	2,137	0,894
14-Abr	27,020	3,464	8,781	0,395
16-Abr	26,220	3,362	5,627	0,597
17-May	26,780	3,433	8,078	0,425
18-May	18,330	2,350	4,008	0,586
19-May	23,510	3,014	4,864	0,620
20-May	25,410	3,258	8,003	0,407
21-May	24,740	3,172	9,442	0,336
23-May	24,850	3,186	10,036	0,317
24-May	23,470	3,009	7,142	0,421
25-May	23,880	3,062	10,565	0,290
27-May	22,610	2,899	8,389	0,346
01-Jun	21,470	2,753	4,808	0,573
02-Jun	20,610	2,642	4,697	0,563
03-Jun	20,350	2,609	3,730	0,700
04-Jun	21,470	2,753	8,201	0,336
11-Jun	19,890	2,550	8,324	0,306
11-Jun	18,880	2,421	8,926	0,271
12-Jul	19,700	2,526	5,500	0,459
12-Jul	19,450	2,494	7,607	0,328
14-Jul	18,070	2,317	4,490	0,516
19-Jul	21,240	2,723	6,275	0,434
21-Jul	17,470	2,240	3,711	0,603
22-Jul	21,300	2,731	4,485	0,609
26-Jul	24,000	3,077	9,772	0,315
27-Jul	23,330	2,991	6,683	0,448
28-Jul	22,750	2,917	5,427	0,537
29-Jul	21,890	2,806	5,643	0,497
02-Ago	23,050	2,955	6,566	0,450
03-Ago	22,580	2,895	5,332	0,543
04-Ago	24,350	3,122	6,007	0,520
09-Ago	27,300	3,500	8,507	0,411
10-Ago	24,780	3,177	7,109	0,447
11-Ago	23,600	3,026	5,199	0,582
12-Ago	28,630	3,671	8,499	0,432

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 10 - Eficiência dos arranjos fotovoltaicos e do inversor para 1.000 W/m2 de radiação solar.

Eficiência dos Módulos			Potência Total AC (W)	Potência Total DC (W)	Eficiência Investidor
M1	M2	M3			
0,175	0,064	0,130	3014,961	5066,536	0,595
0,141	0,033	0,040	2988,023	3244,163	0,921
0,156	0,098	0,115	4935,321	5089,773	0,970
0,143	0,034	0,036	2892,489	3043,179	0,950
0,139	0,027	0,101	2610,384	4310,489	0,606
0,139	0,033	0,038	3000,231	3241,809	0,925
0,156	0,030	0,110	4235,951	4403,264	0,962
0,153	0,061	0,079	4000,231	4189,319	0,955
0,171	0,052	0,166	5323,456	5693,865	0,935
0,172	0,044	0,166	5233,925	5320,999	0,984
0,084	0,064	0,089	3402,231	3556,704	0,957
0,101	0,118	0,146	4735,723	5011,158	0,945
0,132	0,035	0,131	2546,667	5331,789	0,478
0,103	0,099	0,070	2051,368	3691,230	0,556
0,152	0,039	0,137	4913,560	5198,487	0,945
0,134	0,054	0,048	3690,452	3843,439	0,960
0,125	0,030	0,024	2801,164	2903,146	0,965
0,145	0,034	0,045	2792,119	3350,635	0,833
0,066	0,063	0,077	2803,460	2965,576	0,945
0,120	0,028	0,024	2735,001	2886,988	0,947
0,109	0,012	0,083	2856,780	3042,210	0,939
0,156	0,039	0,092	4189,873	4443,321	0,943
0,080	0,093	0,139	5521,235	5784,208	0,955
0,118	0,047	0,039	3410,150	3553,853	0,960
0,142	0,033	0,048	2958,890	3217,271	0,920
0,105	0,011	0,081	2825,682	3071,578	0,920
0,060	0,057	0,077	982,419	2878,528	0,341
0,144	0,028	0,098	4002,531	4328,812	0,925
0,070	0,067	0,076	2675,231	2886,408	0,927
0,121	0,027	0,086	1070,127	3526,410	0,303
0,133	0,117	0,096	4327,535	4901,757	0,883
0,141	0,137	0,036	4020,144	4743,749	0,847
0,108	0,017	0,128	3165,029	3797,373	0,833
0,111	0,101	0,066	3703,586	4173,036	0,888
0,122	0,111	0,092	4437,542	5201,256	0,853
0,059	0,068	0,065	1204,485	2775,508	0,434
0,094	0,019	0,121	3339,372	3644,519	0,916
0,101	0,032	0,114	2605,011	3672,351	0,709
0,131	0,096	0,087	736,608	4971,737	0,148
0,090	0,081	0,066	2080,570	3564,760	0,584
0,167	0,061	0,104	3022,443	4504,339	0,671
0,124	0,107	0,093	1576,439	4909,219	0,321
0,129	0,055	0,121	3677,653	4950,582	0,743
0,097	0,025	0,122	2827,307	3826,759	0,739
0,097	0,028	0,090	1808,002	3161,861	0,572
0,131	0,044	0,075	1161,355	3611,892	0,322
0,103	0,038	0,129	3268,278	3959,055	0,826
0,170	0,042	0,105	2951,492	4292,641	0,688
0,149	0,130	0,097	4286,208	5259,131	0,815
0,123	0,071	0,096	3199,626	4031,237	0,794
0,187	0,072	0,204	4480,202	6369,634	0,703
0,123	0,051	0,119	3682,271	4552,784	0,809
0,156	0,018	0,168	3339,626	4790,001	0,697
0,092	0,014	0,059	2101,453	2314,812	0,908
0,094	0,011	0,058	2123,410	2369,634	0,896
0,108	0,015	0,065	2700,128	2806,734	0,962
0,147	0,020	0,054	2327,267	3299,043	0,705
0,138	0,019	0,052	2340,518	3231,957	0,724
0,123	0,016	0,096	3156,890	3343,626	0,944
0,126	0,033	0,131	2499,185	4097,404	0,610
0,149	0,035	0,047	2754,192	3275,701	0,841
0,167	0,067	0,102	3367,529	4547,161	0,741
0,125	0,104	0,079	3968,225	4387,999	0,904
0,108	0,080	0,038	2950,514	3423,619	0,862
0,093	0,090	0,045	3258,064	3564,688	0,914
0,110	0,104	0,077	3789,573	4418,851	0,858
0,125	0,119	0,076	4064,351	4770,743	0,852
0,145	0,038	0,178	3166,097	5737,458	0,552
0,161	0,058	0,127	3178,129	5072,021	0,627
0,127	0,031	0,141	4312,058	4988,404	0,864
0,164	0,043	0,192	3948,956	5709,872	0,692
0,084	0,100	0,041	3445,160	3633,951	0,948
0,158	0,028	0,155	2106,066	5109,074	0,412
0,141	0,044	0,170	5030,396	5942,712	0,846
0,125	0,019	0,148	3632,547	4463,427	0,814
0,116	0,013	0,140	3503,890	3674,521	0,954

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 11 - Eficiência dos arranjos fotovoltaicos e do inversor para 800 W/m2 de radiação solar.

Eficiência dos Módulos			Potência Total AC	Potência Total DC	Eficiência Investidor
M1	M2	M3	(W)	(W)	
0,115	0,109	0,101	3805,230	4099,923	0,928
0,187	0,048	0,181	5120,452	5398,260	0,949
0,121	0,082	0,116	3852,421	3977,015	0,969
0,136	0,072	0,075	3251,621	3441,857	0,945
0,148	0,048	0,150	2035,041	4492,889	0,453
0,178	0,058	0,176	4022,563	4675,559	0,860
0,142	0,074	0,112	3798,834	3920,439	0,969
0,158	0,051	0,123	3867,232	4044,696	0,956
0,144	0,016	0,111	3122,560	3286,620	0,950
0,160	0,101	0,167	5420,150	5570,947	0,973
0,164	0,053	0,164	4265,129	4450,936	0,958
0,174	0,101	0,150	5001,234	5199,214	0,962
0,161	0,093	0,128	4315,912	4501,706	0,959
0,146	0,048	0,116	3799,451	3919,912	0,969
0,135	0,127	0,115	3022,420	4096,559	0,738
0,151	0,097	0,140	4115,561	4347,994	0,947
0,120	0,114	0,094	1499,440	3771,273	0,398
0,107	0,104	0,089	3225,910	3829,094	0,842
0,106	0,103	0,091	3109,898	3872,648	0,803
0,077	0,078	0,061	2029,177	2318,833	0,875
0,162	0,105	0,153	4372,561	4532,763	0,965
0,129	0,051	0,073	2802,412	2932,364	0,956
0,168	0,112	0,181	4860,731	5013,956	0,969
0,188	0,121	0,202	4796,759	6070,974	0,790
0,053	0,055	0,042	1141,608	1706,727	0,669
0,163	0,108	0,183	3354,617	5126,726	0,654
0,172	0,021	0,131	4281,183	4323,685	0,990
0,146	0,066	0,159	1358,524	4371,957	0,311
0,156	0,110	0,175	4356,808	5956,659	0,731
0,080	0,072	0,101	4076,103	2662,109	1,531
0,118	0,095	0,120	3337,161	4454,160	0,749
0,056	0,044	0,063	1452,321	2081,691	0,698
0,183	0,125	0,194	2858,050	5951,750	0,480
0,204	0,061	0,218	4442,485	6352,399	0,699
0,110	0,040	0,137	3457,901	3659,126	0,945
0,154	0,099	0,106	4025,529	4632,515	0,869
0,049	0,045	0,057	942,672	1974,125	0,478
0,065	0,060	0,067	1669,099	2253,713	0,741
0,122	0,046	0,144	3159,413	4183,402	0,755
0,110	0,037	0,063	2245,613	2498,180	0,899
0,123	0,034	0,068	2549,901	2908,540	0,877
0,122	0,026	0,069	2537,269	2751,889	0,922
0,112	0,114	0,100	3751,439	4216,066	0,890
0,117	0,027	0,159	2773,980	3981,942	0,697
0,153	0,050	0,160	1036,250	4641,031	0,223
0,159	0,061	0,110	3002,397	4468,457	0,672
0,157	0,110	0,152	2998,713	4441,406	0,675
0,201	0,116	0,193	3931,325	5369,506	0,732
0,111	0,043	0,102	3149,213	3238,399	0,972
0,135	0,092	0,143	2838,852	4340,002	0,654
0,178	0,112	0,204	4543,971	6071,786	0,748
0,153	0,080	0,123	3422,043	3895,855	0,878
0,185	0,187	0,057	4310,128	4897,637	0,880
0,110	0,104	0,038	2998,152	3298,241	0,909
0,143	0,127	0,088	1647,145	4528,832	0,364
0,114	0,046	0,111	2642,345	3421,936	0,772
0,146	0,051	0,159	3716,429	3815,217	0,974
0,117	0,109	0,076	3198,784	3373,413	0,948

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 12 - Eficiência dos arranjos fotovoltaicos e do inversor para 600 W/m² de radiação solar.

Eficiência dos Módulos			Potência Total AC (W)	Potência Total DC (W)	Eficiência Investidor
M1	M2	M3			
0,048	0,143	0,053	1500,231	1863,047	0,805
0,194	0,149	0,222	4644,263	5134,825	0,904
0,230	0,133	0,185	1303,526	4402,492	0,296
0,242	0,139	0,197	4435,183	4553,160	0,974
0,104	0,106	0,117	2501,744	2531,898	0,988
0,128	0,073	0,100	2003,934	2533,219	0,791
0,039	0,113	0,044	1700,562	1891,024	0,899
0,031	0,142	0,138	1804,610	2937,649	0,614
0,145	0,120	0,142	2935,635	3337,953	0,879
0,178	0,058	0,176	4022,563	4675,559	0,860
0,164	0,135	0,174	2820,350	3700,461	0,762
0,031	0,141	0,156	2669,586	2979,082	0,896
0,092	0,094	0,102	1626,952	2662,487	0,611
0,217	0,205	0,156	4568,230	5086,211	0,898
0,196	0,072	0,100	2855,653	3222,248	0,886
0,182	0,121	0,212	4911,702	5137,846	0,956
0,180	0,065	0,093	2898,564	3197,050	0,907
0,206	0,157	0,242	3770,464	5263,203	0,716
0,189	0,124	0,182	3458,189	4325,568	0,799
0,202	0,191	0,223	3830,169	5978,388	0,641
0,090	0,081	0,088	2001,912	2426,501	0,825
0,202	0,190	0,222	4016,487	5404,901	0,743
0,205	0,167	0,222	4082,519	5217,615	0,782
0,114	0,123	0,150	2046,158	2918,682	0,701
0,030	0,104	0,121	1727,346	2614,544	0,661
0,227	0,155	0,236	3927,830	5070,744	0,775
0,031	0,134	0,129	2104,010	2626,399	0,801
0,165	0,112	0,171	3110,985	4233,465	0,735
0,193	0,070	0,100	2924,772	3222,449	0,908
0,243	0,073	0,114	2821,699	4139,262	0,682
0,166	0,111	0,162	2518,655	4335,647	0,581
0,082	0,051	0,131	1963,727	2209,619	0,889
0,104	0,103	0,139	1830,587	2689,656	0,681
0,032	0,142	0,118	1854,772	2588,569	0,717
0,179	0,128	0,192	3234,911	4012,853	0,806
0,177	0,112	0,168	3473,566	4265,670	0,814
0,192	0,132	0,179	2890,872	3986,205	0,725
0,235	0,135	0,197	2626,137	4477,419	0,587
0,273	0,121	0,188	3191,119	4404,534	0,725
0,062	0,038	0,082	1179,118	1447,929	0,814
0,191	0,129	0,185	2965,012	5082,746	0,583
0,197	0,105	0,222	2935,496	4959,620	0,592
0,228	0,100	0,163	2757,910	4844,596	0,569
0,184	0,124	0,211	3186,608	5092,192	0,626
0,160	0,161	0,115	3139,337	4578,544	0,686
0,220	0,124	0,215	4836,117	5347,506	0,904
0,227	0,174	0,259	3980,232	5182,266	0,768
0,146	0,081	0,117	2424,457	2623,167	0,924

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 13 - Eficiência dos arranjos fotovoltaicos e do inversor para 400 W/m2 de radiação solar.

Eficiência dos Módulos			Potência Total AC (W)	Potência Total DC (W)	Eficiência Investidor
M1	M2	M3			
0,169	0,164	0,173	2313,426	2542,108	0,910
0,218	0,113	0,162	3426,012	3640,085	0,941
0,244	0,166	0,219	2754,034	2887,767	0,954
0,250	0,171	0,235	2563,893	3023,558	0,848
0,170	0,130	0,165	3200,120	3403,435	0,940
0,155	0,113	0,147	2223,560	2536,996	0,876
0,170	0,135	0,174	1452,509	2477,320	0,586
0,107	0,110	0,123	2373,657	2417,429	0,982
0,284	0,244	0,271	3773,544	4046,046	0,933
0,287	0,220	0,306	3635,346	3819,781	0,952
0,129	0,094	0,132	2005,123	2567,493	0,781
0,265	0,229	0,263	3023,895	4229,955	0,715
0,289	0,225	0,276	2816,630	4245,955	0,663
0,223	0,153	0,212	3423,837	3787,303	0,904
0,388	0,095	0,139	3066,917	3922,223	0,782
0,171	0,098	0,136	2200,560	2554,985	0,861
0,304	0,230	0,332	4569,892	5084,556	0,899
0,144	0,105	0,140	2496,097	2510,408	0,994
0,126	0,148	0,169	2261,602	3011,775	0,751
0,216	0,187	0,206	3775,286	4090,604	0,923
0,174	0,142	0,175	3015,017	3366,603	0,896
0,181	0,147	0,185	1827,680	3379,090	0,541
0,227	0,149	0,205	2523,456	2744,817	0,919
0,109	0,081	0,100	1980,356	2163,362	0,915
0,066	0,195	0,075	1473,285	1840,061	0,801
0,343	0,270	0,335	2546,088	4305,068	0,591
0,067	0,198	0,072	1790,073	1832,565	0,977
0,196	0,160	0,200	1604,511	3462,023	0,463
0,322	0,125	0,209	1369,748	2968,963	0,461
0,174	0,128	0,176	1500,236	2307,178	0,650
0,197	0,162	0,194	2103,375	3342,090	0,629
0,289	0,250	0,279	2771,295	4149,313	0,668
0,231	0,180	0,219	3577,821	4266,822	0,839
0,275	0,217	0,261	3970,192	4176,966	0,950
0,162	0,093	0,133	2264,153	2578,905	0,878
0,195	0,144	0,195	2115,089	2540,308	0,833
0,211	0,162	0,138	3189,231	3433,153	0,929
0,274	0,209	0,306	928,393	5029,162	0,185
0,124	0,092	0,126	1936,456	2229,483	0,869
0,177	0,143	0,183	2966,307	3105,197	0,955
0,226	0,183	0,240	2899,078	3239,698	0,895
0,199	0,160	0,204	2245,876	2598,474	0,864
0,293	0,228	0,288	3754,204	4178,868	0,898
0,369	0,288	0,411	3188,663	5153,680	0,619
0,346	0,179	0,260	2336,931	3654,778	0,639
0,075	0,220	0,074	1242,165	1869,362	0,664
0,150	0,116	0,155	1464,881	2503,298	0,585
0,266	0,074	0,506	2699,842	3897,489	0,693
0,204	0,136	0,187	3607,023	3758,496	0,960
0,178	0,119	0,168	3016,021	3253,934	0,927
0,254	0,135	0,186	3166,137	3578,757	0,885
0,205	0,198	0,205	2812,134	3219,145	0,874
0,208	0,160	0,175	2564,240	3668,126	0,699
0,186	0,152	0,237	3016,370	3199,604	0,943
0,318	0,160	0,252	3078,009	3579,654	0,860
0,104	0,104	0,100	1162,220	1165,799	0,537
0,199	0,184	0,199	3616,806	4279,531	0,845
0,318	0,245	0,296	2925,881	4249,151	0,689
0,257	0,205	0,251	3720,432	4269,740	0,871
0,232	0,171	0,250	3525,460	4080,092	0,864
0,215	0,180	0,216	3393,473	4303,085	0,789
0,271	0,211	0,272	2278,829	2572,934	0,638
0,294	0,261	0,287	3879,248	4480,045	0,866
0,245	0,205	0,236	3509,226	4313,560	0,814
0,267	0,211	0,264	2586,188	3829,458	0,675
0,249	0,196	0,255	1824,318	3786,718	0,482
0,188	0,157	0,191	2388,561	3222,620	0,741
0,204	0,129	0,202	2331,117	3368,816	0,692
0,119	0,078	0,125	1721,435	2060,442	0,835
0,054	0,127	0,058	1011,950	1450,046	0,698
0,218	0,115	0,162	2638,643	3697,306	0,714
0,333	0,080	0,132	3010,832	3864,172	0,779
0,243	0,125	0,187	2808,419	3625,167	0,775
0,197	0,134	0,183	2297,973	2928,046	0,785
0,150	0,152	0,144	1881,436	2036,260	0,924
0,261	0,203	0,263	2312,874	4131,830	0,560
0,179	0,117	0,163	1833,402	2791,258	0,657
0,211	0,082	0,157	2749,404	2831,014	0,971
0,231	0,158	0,202	1915,264	3757,262	0,510
0,269	0,233	0,268	2385,415	4189,986	0,569
0,226	0,176	0,218	3135,794	4225,515	0,742
0,195	0,151	0,204	2222,760	3154,212	0,705
0,182	0,134	0,205	3481,179	3644,269	0,955
0,216	0,168	0,213	3491,395	4251,733	0,821
0,174	0,139	0,180	1784,297	2530,468	0,705
0,196	0,152	0,196	3531,704	3864,695	0,914
0,199	0,165	0,209	3294,937	3798,413	0,867
0,186	0,150	0,190	1804,160	3119,933	0,578
0,227	0,174	0,221	2554,430	4144,077	0,616
0,205	0,158	0,204	3063,585	3509,569	0,873
0,105	0,072	0,151	2003,632	2445,275	0,819
0,158	0,117	0,160	1865,511	2258,558	0,826
0,111	0,135	0,116	1810,748	2655,702	0,682
0,221	0,149	0,222	3620,824	3920,593	0,924
0,227	0,174	0,259	3980,232	5182,266	0,768
0,182	0,140	0,212	2894,540	3947,577	0,733
0,202	0,165	0,216	3295,755	3507,559	0,940
0,146	0,081	0,117	2424,457	2623,167	0,924
0,129	0,093	0,139	1960,831	2587,942	0,758
0,059	0,175	0,041	852,037	1713,364	0,497
0,188	0,126	0,106	2090,751	2556,499	0,818
0,111	0,112	0,093	1998,546	2359,093	0,847

Fonte: Produção do próprio autor.