

AVALIAÇÃO DO USO DE UM REGISTRADOR DE PERTURBAÇÃO DIGITAL COMO
FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE FONTES CHAVEADAS

ANDERSON AUGUSTO HEINZ

FLORIANÓPOLIS

2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA

**AVALIAÇÃO DO USO DE UM REGISTRADOR DIGITAL DE PERTURBAÇÃO
COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE FONTES CHAVEADAS**

Dissertação submetida ao Mestrado
Profissional do Instituto Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Mestre em
Mecatrônica.

Orientadora: Cynthia Beatriz Scheffer Dutra

Florianópolis
Setembro de 2018

CDD 629.8
H472a

Heinz, Anderson Augusto

Avaliação do uso de um registrador digital de perturbação como ferramenta de desenvolvimento de fontes chaveadas [DIS] / Anderson Augusto Heinz; orientação de Cynthia Beatriz Scheffer Dutra – Florianópolis, 2018.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Fonte chaveada. 2. Registrador de perturbação. 3. Teste funcional. I. Dutra, Cynthia Beatriz Scheffer. II. Título.

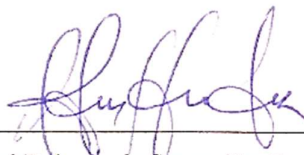
Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065

**AVALIAÇÃO DO USO DE UM REGISTRADOR DIGITAL DE PERTURBAÇÃO
COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE FONTES CHAVEADAS**

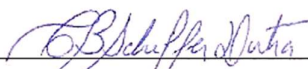
ANDERSON AUGUSTO HEINZ

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e
aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

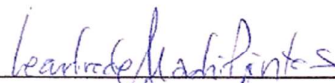
Florianópolis, 28 de setembro de 2018.



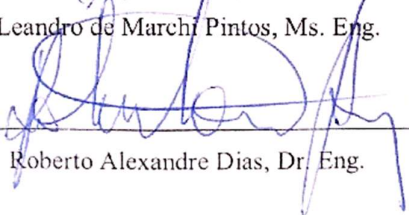
André Roberto de Sousa, Dr. Eng.



Cynthia Beatriz Scheffer Dutra, Dra. Eng.



Leandro de Marchi Pintos, Ms. Eng.



Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela força que me proporcionou nos momentos de fraqueza e indecisão e pelas pessoas maravilhosas que colocou em minha vida.

Aos meus pais, Jacó e Joseane, que, me ensinam o quão importante é a educação. Sempre acreditaram na minha capacidade e me incentivaram a continuar estudando e me apoiaram em todos os momentos.

À minha querida namorada, Marina, por ficar sempre ao meu lado, me acalmando quando eu estava nervoso e me motivando quando eu precisava. Seu carinho e apoio foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Ao meu irmão, Alan, que sempre me incentiva e compartilha os melhores momentos comigo.

Aos colegas da GE, Diogo, Leandro, Lucas, Filipe e Rodrigo, cada um com a sua contribuição, e todas fundamentais.

Aos professores do IFSC, em especial, aos Ms. Eng. Adriano e Dr. Eng. Roberto, pela orientação e ajuda nos estágios iniciais deste trabalho.

À professora orientadora Dra. Eng. Cynthia, por acreditar em mim e no sucesso deste trabalho. Por todas as dicas e contribuições que engrandeceram este trabalho. Sou realmente grato pela sua orientação e ajuda.

Aos meus amigos e familiares, por todos os momentos vividos juntos. Todos me ajudaram de alguma forma a realizar este sonho.

“There is no substitute for hard work”
(Thomas Alva Edison)

RESUMO

Testes funcionais de fontes chaveadas costumam ser uma tarefa complexa que envolve bastante experiência do engenheiro, muitos equipamentos e várias horas de trabalho. Tal fato é influenciado pela falta de equipamentos dedicados a essa finalidade.

Existem algumas soluções capazes de auxiliar neste processo através da combinação de equipamentos de uso genérico com software de controle e análise. Salienta-se que esse tipo de solução é cara e inviável para empresas com baixo volume de produção de fontes.

Neste cenário, surge o presente trabalho que objetiva apresentar uma solução na qual um registrador digital de perturbações, modelo DR60 da linha de produtos Reason da empresa General Electric, foi modificado para que pudesse realizar a aquisição de dados de forma automática. Tal modificação utiliza os canais de tensão e corrente para medição da entrada e saída da fonte sob teste, bem como emprega o uso das saídas digitais para controle dos estágios de acionamento da carga e energização da fonte.

A implementação da lógica de controle e acionamento dos circuitos presentes no hardware do DR60 foi feita através do desenvolvimento de um programa que é executado diretamente no equipamento. A sequência de eventos descrita no programa foi pensada de modo a provocar todas as condições de funcionamento necessárias para execução dos testes.

A grande vantagem da solução desenvolvida é possibilitar ao engenheiro a visualização de todas as formas de onda de tensão e corrente necessárias para obtenção dos resultados de cada teste. Neste ponto, uma planilha de cálculo foi elaborada especificamente para auxiliar na análise dos dados e na geração do relatório do teste.

Para a validação do protótipo e da planilha de cálculo, duas fontes chaveadas foram testadas seguindo a nova metodologia de testes em comparação com a atual. Os resultados obtidos com o protótipo foram considerados satisfatórios e coerentes com os resultados obtidos pelo método atual de teste. Além disso, o tempo de testes foi reduzido de 16 para 2 horas – uma redução de quase 90%. Considerando os resultados e comparações com o método atual de testes, pode-se afirmar que o DR60 modificado é uma ferramenta eficiente de desenvolvimento de fontes chaveadas.

Palavras-chave: Fonte chaveada, registrador de perturbação, Teste funcional.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE USE OF A DIGITAL FAULT RECORDER AS A TOOL IN POWER SUPPLY DEVELOPMENT

Power supply functional tests are complex tasks that demands an experienced engineer, many equipment and several working hours. This fact is influenced by the lack of dedicated equipment for this purpose.

There are solutions capable to help in this test process through a combination of generic equipment with analyses and control software. This kind of solution is expensive and unviable for companies with low power supply production rate.

In this scenario, this work is conceived with the objective to present a solution where a digital fault recorder model DR60 from Reason product line by General Electric was modified in order to be able to make the data acquisition automatically. Such modification uses voltage and current channels to measure both input and output of the power supply under test as well as make use of binary outputs to control the load actuation and power up stages.

The implementation of the actuation and control logic of the hardware circuits of DR60 was done with the development of a program that runs directly in the equipment. The sequence of events described in the program was thought in a way that it creates all the conditions to execute the tests.

The big advantage of this solution is to make possible to the engineer to see all voltage and current waveforms. A calculation spreadsheet was developed to help on the data analysis and report generation.

In order to validate this prototype and the calculation spreadsheet, two power supplies were tested following the new and also current methodology. The prototype results were considered reasonable and coherent with the results from current test methodology. Besides that, the required time for functional test was reduced from 16 to 2 hours – almost 90% of time reduction. Considering the results and comparisons with the current method of test it is possible to conclude that the modified DR60 is an efficient tool for power supply development.

Keywords: Power supply, fault recorder. functional test.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GE	– General Electric
CA	– Corrente Alternada
CC	– Corrente Contínua
THD	– Total Harmonic Distortion
RTB	– Reason Tecnologia Brasil
ATS	– Automatic Test System
ATE	– Automatic Test Equipment
HMI	– Human-Machine Interface
NI	– National Instruments
RMS	– Root Mean Square
LED	– Light Emitting Diode
IGBT	– <i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
ADC	– Analog-to-Digital Converter
IEC	– <i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	– <i>Intelligent Electronic Devices</i>
SO	– Sistema Operacional
PCI	– Printed Circuit Board
SSH	– Secure Shell
VVC	– Valor Verdadeiro Convencional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Introdução geral.....	13
1.2. Objetivo principal.....	15
1.3. Objetivos específicos.....	15
1.4. Justificativa e relevância.....	15
1.5. Abrangência e delimitação do escopo	16
2. CONVERSORES E TESTES FUNCIONAIS.....	16
2.1. Conversores estáticos	16
2.2. Testes funcionais	17
2.2.1. Verificação das potências.....	19
2.2.2. Fator de potência	19
2.2.3. Distorção Harmônica	20
2.2.4. Eficiência.....	20
2.2.5. Consumo máximo.....	20
2.2.6. Corrente de partida	21
2.2.7. Consumo em <i>stand-by</i>	21
2.2.8. Tempo de sustentação.....	21
2.2.9. Tempo de inicialização	22
2.2.10. Resposta dinâmica à variação de carga	22
2.2.11. Regulação de carga	22
2.2.12. Regulação de linha	23
2.2.13. Ruído da tensão de saída	23
2.3. Descrição do método atual de testes.....	24
2.4. Soluções comerciais e trabalhos similares.....	27
2.4.1. Equipamentos genéricos	27

2.4.2.	Sistemas de teste automático.....	28
2.4.3.	Trabalhos similares.....	30
3.	REGISTRADORES DE PERTURBAÇÃO.....	33
3.1.	Saídas binárias.....	34
3.2.	Entradas analógicas	35
3.3.	Registrador de perturbação DR60.....	35
3.3.1.	DR60 Saídas binárias.....	36
3.3.2.	DR60 Entradas analógicas	37
3.4.	Software <i>Analise</i>	39
4.	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO E DA NOVA METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO COM DR60 MODIFICADO	40
4.1.	Configuração do DR60.....	41
4.2.	<i>Script</i>	42
4.3.	Conexões elétricas.....	43
4.4.	Procedimento de aquisição de dados do teste	45
4.5.	Procedimento de leitura	47
4.6.	Procedimento de análise e relatório.....	47
4.7.	Detalhamento de como os testes adicionais são calculados na planilha.....	49
5.	ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	51
5.1.	Verificação do protótipo	51
5.1.1.	Multímetro Keysight 3458A	52
5.1.2.	Tensão.....	53
5.1.3.	Corrente.....	57
5.1.4.	Análise	59
5.2.	Estudo de caso 1: fonte CA-CC 60 W.....	60
5.2.1.	Testes - modo manual	61
5.2.2.	Testes – protótipo DR60 modificado.....	71

5.3.	Estudo de caso 2: fonte CC-CC 48 W	77
5.3.1.	Testes – modo manual	78
5.3.2.	Testes – protótipo DR60 modificado.....	88
5.4.	Comparativo dos métodos	91
6.	CONCLUSÕES	94
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
8.	REFERÊNCIAS.....	97
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO <i>SCRIPT</i>	100
	APÊNDICE B – RELATÓRIO DE TESTES DO ESTUDO DE CASO 1	104
	APÊNDICE C – RELATÓRIO DE TESTES DO ESTUDO DE CASO 2	109
	ANEXO I – COEFICIENTES t DE STUDENT	113

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma visão do cenário que motivou o desenvolvimento do trabalho. São apresentados os objetivos principais e específicos bem como sua relevância e justificativa. O capítulo ainda descreve a abrangência e a delimitação do escopo do trabalho.

1.1. Introdução geral

A constante busca pela redução no tempo de desenvolvimento de produtos e otimização dos processos produtivos abre uma grande oportunidade para o desenvolvimento de máquinas automáticas e soluções que melhorem a qualidade do produto final.

Grandes empresas como a General Electric (GE) buscam sempre uma forma de melhorar seus processos e produtos. A GE é uma das maiores referências quando se trata de soluções para o setor de geração e distribuição de energia elétrica no mundo (GE POWER, 2018).

O departamento da GE responsável pelo desenvolvimento de soluções para esse setor é chamado de “*Grid Solutions*”. O setor desenvolve registradores de perturbação, *merging units*¹, relés de proteção², *switches*³ e equipamentos para sincronismo baseados em satélite⁴. Tais equipamentos são fundamentais para garantir o bom funcionamento de todo o sistema de energia. Além de garantir o funcionamento, eles também são responsáveis pela segurança do sistema através do acionamento de circuitos de proteção (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007).

Cada um dos produtos citados acima também precisa de energia para funcionar. De fato, todo equipamento eletrônico possui algum tipo de fonte para atender seu próprio consumo. Fonte é o termo dado ao conversor de potência utilizado para adequar a energia disponível na rede de transmissão ao equipamento.

Analisando o processo completo de desenvolvimento de fontes da unidade da GE em Florianópolis (RTB – Reason Tecnologia Brasil), constatou-se que uma parcela significativa do tempo é dedicada às etapas de teste e relatórios de protótipos.

¹ Equipamento que realiza a aquisição de sinais analógicos e os envia para a rede de comunicação digitalmente.

² O relé protege o sistema elétrico de potência atuando na abertura de um ou mais disjuntores da rede de modo a isolar o problema local, protegendo, assim, os elementos que o compõem.

³ Equipamento utilizado em redes com objetivo de direcionar os pacotes aos nós de destino.

⁴ Sincronismo via satélite permite que equipamentos estejam sincronizados com boa precisão independente de sua localização geográfica.

Testes de desenvolvimento são testes realizados em protótipos de novos projetos (ou atualizações significativas de projetos existentes) com o objetivo de confrontar o resultado prático com o projeto e determinar se o protótipo está funcionando como esperado.

De acordo com os engenheiros que trabalham na etapa de testes, o principal motivo pelo tempo despendido nesta atividade reside na falta de um equipamento dedicado à verificação de fontes chaveadas.

Atualmente, para executar todos os testes de desenvolvimento, faz-se necessário o uso de vários equipamentos como osciloscópio, carga eletrônica, fonte programável, wattímetro, multímetro, entre outros. Além disso, cada teste exige uma preparação diferente destes equipamentos. O fato é que se perde mais tempo montando e ajustando os cenários de teste do que executando o teste em si.

De fato, existem algumas soluções no mercado capazes de realizar a maioria dos testes de forma rápida e automática, porém, essas soluções são muito caras e customizadas, o que inviabiliza seu uso em empresas com baixa produção de fontes.

Com base nessa problemática, um registrador digital de perturbações foi modificado para que pudesse ser utilizado como ferramenta de testes de fontes chaveadas. A implementação é realizada no registrador DR60 (Registrador da linha de produtos Reason – GE) através de ajustes de configuração, conexões elétricas entre os circuitos digitais e analógicos além de um *script*⁵ desenvolvido em linguagem Shell.

Como se trata de uma nova ferramenta de testes, também foi necessário desenvolver uma metodologia de testes. Esta nova metodologia envolve as etapas de aquisição de dados, leitura do arquivo gerado ao final do teste, análise e interpretação dos dados aquisitados e geração de relatório.

Para a etapa de análise e geração de relatório, desenvolveu-se uma planilha de cálculo onde os dados brutos são inseridos e a geração do relatório se dá de forma automática.

A eficácia da nova ferramenta é verificada através de dois estudos de caso, onde fontes com topologias bem diferentes são analisadas confrontando a nova metodologia com a atual.

⁵ Conjunto de instruções que são executadas de maneira sequencial por um programa de computador.

1.2. Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho do registrador de perturbação DR60 modificado para operar como equipamento de testes funcionais em fontes chaveadas. Ao final do trabalho, busca-se que as modificações implementadas, aliadas às características intrínsecas do registrador DR60, permitam o seu uso como ferramenta de desenvolvimento e verificação de fontes chaveadas.

1.3. Objetivos específicos

- Descrever os testes funcionais que devem ser realizados;
- Avaliar diferentes tipos de fontes chaveadas;
- Otimizar o protótipo para reduzir o tempo de testes;
- Facilitar a geração de relatórios de teste;
- Comparar os resultados do protótipo com a metodologia atual.

1.4. Justificativa e relevância

O projeto é motivado pela falta de equipamentos dedicados (no laboratório da GE – Florianópolis) para realização dos diversos testes necessários para verificação e análise de desempenho de fontes chaveadas. Um equipamento eletrônico, por melhor que seja, terá sua qualidade comprometida caso sua fonte não tenha qualidade suficiente – dada a importância dos testes na qualidade do produto final. Por isso, não verificar o desempenho da fonte antes de sua produção em escala deixa o projeto vulnerável a problemas de campo (HANRAHAN, 2013).

Desta forma, a etapa de testes com protótipo torna-se lenta e pouco eficaz acarretando em um tempo de desenvolvimento relativamente alto.

Todo novo projeto de fonte deve, inevitavelmente, ser submetido à uma grande quantidade de testes desde seu primeiro protótipo até sua liberação para produção. Essa fase de protótipo normalmente envolve pelo menos duas iterações de testes antes da produção. De maneira similar, os projetos atuais que estão passando por alguma modificação também devem ser testados para garantir o funcionamento correto.

1.5. Abrangência e delimitação do escopo

A solução apresentada neste projeto permite realizar testes funcionais em qualquer tipo de conversor estático que se encaixe dentro das características elétricas máximas apresentadas na seção 3.3. Apesar de realizar diversos testes funcionais, este equipamento não cobre todos os testes necessários para verificar um projeto de uma fonte e, portanto, cabe ao engenheiro responsável garantir que os demais testes sejam também executados de acordo com os requisitos do projeto e o cumprimento de normas.

O protótipo desenvolvido não realiza a interpretação dos dados e também não gera relatórios do tipo *Pass* e *Fail*, cabendo ao responsável pelo teste a interpretação dos dados obtidos através da inserção correta na planilha de cálculo e relatório.

A implementação realizada no equipamento é focada para ambiente de testes de desenvolvimento onde o engenheiro possui conhecimento técnico sobre o equipamento e sobre os testes executados. A utilização do equipamento no ambiente de produção exigiria modificações como a criação de uma interface amigável e geração de relatório automático.

2. CONVERSORES E TESTES FUNCIONAIS

2.1. Conversores estáticos

De acordo com Barbi (2012), um conversor estático é um sistema composto por elementos eletrônicos (passivos e ativos) associados de uma forma que torne possível realizar o controle de fluxo da energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos.

Os conversores estáticos podem desempenhar diferentes funções de acordo com o tipo de conversão realizado (BARBI, 2012). Cada função é resultado de um controle específico de fluxo de energia. A Figura 1 mostra diversas terminologias comumente associadas às funções dos conversores.

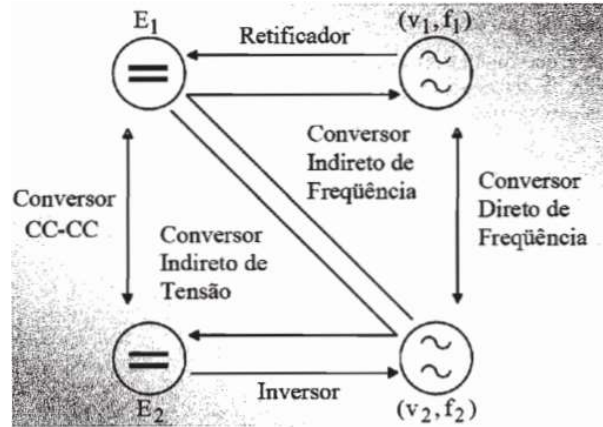


Figura 1. Funções dos conversores estáticos. Fonte: (Barbi, 2012)

Na Figura 1, E_1 e E_2 representam potenciais de tensão contínua enquanto (v_1, f_1) e (v_2, f_2) são representações de potenciais de tensão alternada, onde v indica a magnitude eficaz da tensão e f a frequência.

A maioria dos equipamentos eletrônicos são alimentados pela rede elétrica de baixa tensão (padrão universal: 90-264 V ca) e, portanto, necessitam de um conversor CA-CC para gerar as tensões CC internas requeridas para funcionamento dos componentes eletrônicos. Alguns equipamentos funcionam diretamente com corrente contínua devido suas aplicações. Nestes casos o conversor CC-CC ainda se faz necessário para adequar o nível de tensão da entrada e gerar as demais tensões. O conversor que é utilizado para suprir energia de um equipamento eletrônico é comumente chamado de fonte de alimentação ou simplesmente fonte.

É comum que equipamentos que atuam com funções de proteção ou controle em subestações de energia sejam alimentados diretamente por tensão CC proveniente do banco de baterias da subestação.

Embora a solução aqui apresentada permita testar qualquer conversor que esteja dentro de suas características elétricas, somente serão realizados estudos de caso com conversores CC-CC e CA-CC pois estes são os tipos utilizados como fonte de alimentação dos equipamentos produzidos pela GE em Florianópolis.

2.2. Testes funcionais

O projeto de uma fonte envolve bastante atenção e muitos cálculos para seu correto funcionamento. Durante a etapa de projeto, o engenheiro toma todos os cuidados e certifica-se através de cálculos e simulações que o circuito projetado funcione adequadamente. Mas há uma

grande diferença entre a teoria e a prática quando se trata de eletrônica de potência. Mesmo um projetista com muitos anos de experiência pode ter que fazer ajustes no projeto antes de disponibilizar para a produção em massa.

A importância da verificação das especificações de projeto através dos testes de bancada com protótipo pode ser fundamental para o sucesso do projeto. Segundo Ray Ridley (2018) o projetista deve ir para a etapa de testes com protótipo o mais rápido possível, não devendo gastar muito tempo com simulações. De fato, a simulação é uma ferramenta importante e de grande ajuda no entendimento do circuito, porém ela deve ser refinada após os testes de bancada. Ainda segundo o autor, a verificação do circuito nos estágios mais iniciais do desenvolvimento reduz o esforço de cálculo e permite que problemas sejam identificados com bastante antecedência.

Os testes de desempenho sugeridos abaixo permitem uma boa cobertura funcional do conversor sob teste pois permitem que vários parâmetros de projeto sejam verificados de forma rápida e não invasiva.

- Potência aparente, Potência ativa, Potência reativa e Potência de saída;
- Fator de potência;
- THD (Distorção harmônica total);
- Eficiência;
- Consumo máximo;
- Corrente de partida;
- Consumo em *stand-by*;
- Tempo de sustentação;
- Tempo de inicialização;
- Resposta dinâmica à variação de carga;
- Regulação de carga;
- Regulação de linha;
- Ruído da tensão de saída.

Cada um dos testes citados será detalhado a seguir juntamente com a metodologia e cuidados com a sua execução.

2.2.1. Verificação das potências

Testes de medição de potência são realizados tanto na entrada da fonte quanto na saída. A medição das potências é um bom método de verificação de funcionamento pois permite identificar componentes defeituosos, problemas de montagem ou até mesmo mal dimensionamento de componentes. Para conversores que operam com corrente alternada existem três potências a ser determinadas no circuito da entrada: Potência Aparente, Potência Ativa e Potência Reativa.

A medição da potência aparente é simples, basta fazer o produto da tensão de entrada com a corrente de entrada (no mesmo instante de tempo). No caso de conversores CC-CC, a potência aparente se iguala à potência ativa e não há potência reativa. A medição das potências citadas requer um wattímetro ou uma fonte com essa capacidade específica.

Atualmente, o laboratório da GE em Florianópolis não possui equipamentos capazes de medir todas as três potências citadas, dessa forma somente a potência aparente é calculada pelo método manual.

2.2.2. Fator de potência

É um indicador da qualidade do uso de energia. É definido conceitualmente como a razão entre a potência ativa e a potência aparente (CRANDALL, 1997). Dessa forma seu valor varia entre 0 e 1. Quanto maior o fator de potência, mais energia é entregue a carga e quanto mais se aproxima de 0, mais energia é desperdiçada.

A medição do fator de potência pode ser feita de formas diferentes, de acordo com os equipamentos disponíveis no laboratório de teste e do tipo de carga. No caso de uma carga linear, pode-se realizar a medição do fator de potência através da diferença de fase entre a tensão e corrente da entrada do conversor. Já para sistemas não-lineares, faz-se necessária também a medição da distorção das formas de onda (CRANDALL, 1997).

Atualmente não são realizados testes para aferir o fator de potência das fontes produzidas na RTB. Tal fato se deve à falta de equipamento dedicado, conforme citado anteriormente. Outro fator relevante é que não há uma exigência grande com relação ao controle do fator de potência devido às características do mercado que, na maioria dos casos, somente utiliza corrente contínua para alimentação dos equipamentos.

2.2.3. Distorção Harmônica

A quantidade total de distorção harmônica – THD (*Total Harmonic Distortion*) – presente em um sinal é definida como a razão entre a soma da potência de todas as harmônicas pela potência da frequência fundamental (WEIK, 2000). Diferentemente do fator de potência, o THD deve ser o menor possível para diminuir interferências eletromagnéticas e perdas de núcleo em transformadores.

Assim como o fator de potência, normalmente os conversores produzidos na RTB não possuem restrição com relação ao nível de distorção harmônica. O THD também não é medido atualmente por falta de equipamento.

2.2.4. Eficiência

A eficiência de uma fonte é dada pela razão entre a potência total das saídas e a potência ativa da entrada. Dessa forma espera-se um valor entre 0 e 1, sendo 1 a situação teórica ideal onde toda a energia consumida na entrada é entregue à carga (CRANDALL, 1997).

A eficiência é um bom parâmetro de avaliação de conversores estáticos pois qualquer problema de montagem ou componente defeituoso normalmente resulta em maior dissipação de calor e consequentemente redução de eficiência.

A medição da potência ativa na entrada de uma fonte CA exige equipamentos não disponíveis no laboratório da empresa. Como forma de estimar a eficiência, pode-se alimentar a fonte com tensão contínua.

2.2.5. Consumo máximo

Trata-se da simples medição da corrente consumida na entrada do conversor, no pior caso de operação. A situação que gera esta condição ocorre com carga máxima e tensão de entrada mínima. Saber este parâmetro permite verificar se o dimensionamento dos componentes do circuito de entrada está adequado. Um consumo muito elevado pode também indicar alguma falha.

O consumo é medido utilizando um multímetro no modo de corrente ajustado para a faixa de corrente apropriada ao conversor.

2.2.6. Corrente de partida

Corrente de partida ou corrente de *inrush* é a medição do pico de corrente que ocorre quando uma carga capacitiva é ligada à uma fonte de tensão. Os conversores normalmente possuem filtros capacitivos em sua entrada e por este motivo apresentam, inevitavelmente, um certo pico de corrente no momento em que são energizados. Sabendo desta característica, os projetistas incluem circuitos que minimizam a formação deste pico. Mesmo suavizado, ele ocorre e normalmente é um dos requisitos de projeto e deve ser verificado (C. S. MITTER, 1995).

Para a medição, é necessário um osciloscópio com ponteira de corrente ou então inserir um resistor tipo *shunt* na entrada do conversor e medir a tensão sobre seus terminais utilizando o osciloscópio.

2.2.7. Consumo em *stand-by*

É o consumo de operação do conversor quando não há carga. Diferentemente do consumo máximo, aqui a medição é feita sem carga, mas também com a tensão mínima na entrada. Outra diferença é que o consumo aqui é representado em potência. Isto é feito por dois motivos, o primeiro é que a corrente neste caso é muito pequena (na ordem de alguns mA). O segundo motivo é que, quando se trata de consumo em *stand-by*, normalmente há a preocupação com o gasto energético do equipamento, logo, o resultado em potência permite o cálculo do custo da energia.

2.2.8. Tempo de sustentação

O tempo de sustentação (*Hold-up time*) é o tempo que leva até a tensão de saída perder a regulação após a interrupção da alimentação do conversor. Essa medição faz parte dos requisitos de projeto e deve ser verificado e garantido (CRANDALL, 1997).

O teste é realizado com o conversor alimentado em tensão nominal - se tiver mais de uma, todas devem ser testadas. No caso de a tensão nominal ser representada por uma faixa, deve-se testar em ambas as extremidades (IEC, 2010).

Aplica-se a carga nominal e, após estabilização deve-se usar uma ponteira do osciloscópio para medir a tensão da entrada e outra para medir a tensão de saída. Neste caso o

osciloscópio deve possuir canais isolados pois as referências podem ser diferentes no caso de um conversor isolado.

2.2.9. Tempo de inicialização

O tempo de inicialização, como o nome sugere, é a medida do tempo que leva para que todas as saídas do conversor atinjam a regulação após ser energizado em uma determinada tensão (CRANDALL, 1997).

O teste do tempo de inicialização envolve a utilização de um osciloscópio com 2 canais isolados, um para medição da tensão de entrada e outro para a medição de saída. Basta configurar o *trigger* do osciloscópio para detectar a borda de subida do canal conectado a tensão de entrada e energizar a fonte.

2.2.10. Resposta dinâmica à variação de carga

A resposta dinâmica a variação de carga mede o tempo que leva para que a saída do conversor recupere a regulação após uma mudança dinâmica de carga. Este parâmetro está relacionado com a resposta do sistema de controle utilizado pelo conversor e com o filtro do circuito da saída (POMILIO, 2014).

O teste utiliza um osciloscópio para a medição da tensão de saída no momento em que ocorre a variação de carga. A aplicação dos diferentes níveis de carga pode ser feita através de uma chave seletora (POMILIO, 2014).

2.2.11. Regulação de carga

O teste de regulação de carga verifica a capacidade do conversor de manter a regulação da tensão de saída independentemente da carga aplicada. O teste é repetido para as tensões nominais de alimentação (CRANDALL, 1997).

A regulação de carga é normalmente apresentada em percentual e calculada segundo equação (1). Para o cálculo deve-se verificar a tensão de saída sem carga e com carga máxima.

$$Reg_carga = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}} \times 100 \quad (1)$$

Da equação tem-se V_{max} como sendo o maior valor de tensão medido (teste sem carga) e V_{min} o menor (teste com carga máxima).

A medição é feita utilizando um multímetro de precisão e a carga é aplicada usando um reostato de potência.

2.2.12. Regulação de linha

De forma similar ao teste de regulação de carga, o objetivo do teste de regulação de linha também é verificar a regulação da tensão de saída, porém desta vez variando a tensão de alimentação do conversor mantendo a carga constante (CRANDALL, 1997). O teste é normalmente executado sem carga, em meia carga e com carga nominal.

A regulação de linha é expressa em porcentagem e determinada pela equação

$$Reg_linha = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} \times 100 \quad (2)$$

onde:

ΔV_{out} é a maior variação entre os valores da tensão de saída,

ΔV_{in} é a maior variação entre os valores da tensão de entrada.

2.2.13. Ruído da tensão de saída

O último dos testes propostos serve para verificar se o ruído da tensão de saída do conversor está dentro do especificado. Um ruído muito alto significa alta quantidade de harmônicas em um sinal que deveria, idealmente, ser puramente contínuo.

A medição é feita com carga nominal e com bastante atenção para o *setup* do teste. A medição é feita utilizando um osciloscópio configurado para medir sinais CA e com uma ponteira própria para medições de ruído (Figura 2). O teste deve ser realizado para diferentes valores de carga (CRANDALL, 1997).



Figura 2. Ponteira com referência especial para medição de ruído. Fonte: Próprio autor

2.3. Descrição do método atual de testes

A realização dos testes atualmente é definida com base na disponibilidade de equipamentos para teste. Alguns testes necessitam de equipamento específico e não disponível devido alto custo de investimento e baixo benefício, uma vez que o foco da empresa não é a fabricação de fontes e conversores, e sim, equipamentos para subestações. Dessa forma, pode-se dizer que a etapa de desenvolvimento apresentaria melhores resultados com a execução de mais testes de desempenho.

Da forma como os dados são coletados hoje, a operação de medição insere muitas variáveis ao teste pois pequenos ajustes no *setup* podem resultar em variações significativas nos resultados. Ou seja, o resultado de cada teste é muito susceptível às variáveis introduzidas pela forma como o engenheiro executa os procedimentos de configuração e leitura de dados. Um cenário típico de teste é apresentado na figura abaixo.

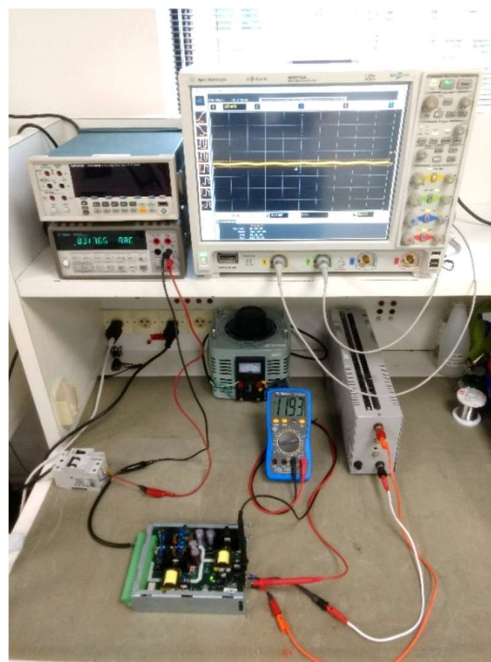


Figura 3. Típico *setup* do teste manual. Fonte: Próprio autor

Incertezas de medição geradas pelo operador podem ser evitadas adicionando um processo bem definido com todas as etapas de medição bem descritas e garantindo que o operador irá executar fielmente as instruções.

O presente projeto introduz uma solução que combina a função de vários equipamentos dedicados em uma única plataforma de testes. As conexões elétricas e a análise dos dados são feitas manualmente, mas a coleta de dados é feita de forma automática.

Atualmente não há um procedimento oficial – dentro da empresa – de como os testes devem ser executados. A forma como os dados são obtidos fica a critério do engenheiro responsável. Normalmente são utilizados multímetros (pelo menos 3) de bancada ou portáteis para medições de tensão e corrente, osciloscópio para medições de ruído, tempo e formas de onda. Como fonte de alimentação, pode-se utilizar um Variac ou uma fonte CC de baixa tensão (menor que 32 V cc) ou de 125 V cc - valor muito comum no ambiente de subestação. Utiliza-se também um reostato como carga resistiva. Normalmente é utilizada uma tabela com todas as variáveis que devem ser medidas em cada situação para posteriormente ser analisada e calculados os resultados. Essa tabela é apresentada a seguir.

Tabela 1. Modelo de tabela utilizado nos testes manuais. Fonte: Próprio autor

Fonte CA modelo:							
Carga Nominal	Carga Real	Tensão Nominal	Tensão Entrada	Corrente Entrada	Tensão Saída	Corrente Saída	Ruído Saída
0%		110 V ca					
50%		110 V ca					
100%		110 V ca					
0%		220 V ca					
50%		220 V ca					
100%		220 V ca					
0%		125 V cc					
50%		125 V cc					
100%		125 V cc					

O processo é iniciado com a preparação da fonte a ser testada em uma bancada com todos os equipamentos auxiliares montados próximos ao local do teste. A tensão de alimentação é ajustada para 110 V ca usando o *Variac* ou uma tomada de mesma tensão. Para permitir controle e adicionar segurança extra ao engenheiro, adiciona-se um disjuntor bipolar na entrada da fonte a ser testada. Como o primeiro teste é sem carga, basta remover a conexão. O procedimento utilizado para realização dos testes é apresentado na Figura 4.

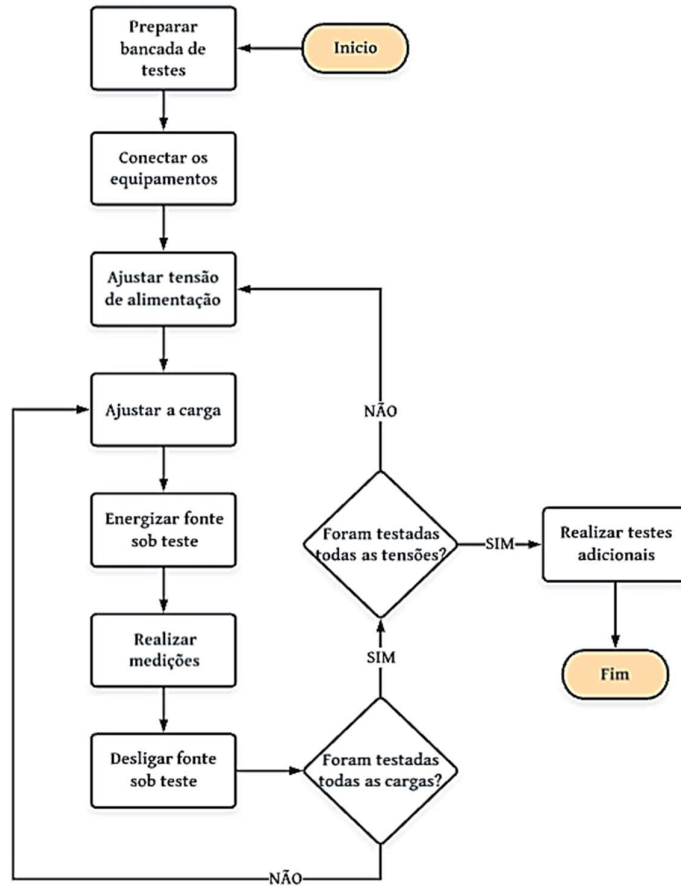


Figura 4. Fluxograma do método de teste manual. Fonte: Próprio autor

Um cuidado especial é necessário com os cabos e conexões para garantir que não ocorram quedas de tensão devido comprimento e/ou bitola mal dimensionada, assim como mau contato.

Após esta configuração, o disjuntor é acionado e espera-se alguns segundos para estabilização da fonte. O processo de leitura de cada multímetro deve ser realizado de forma rápida para minimizar a influência da medição em instantes de tempo diferentes.

O ruído é medido com o osciloscópio usando a ponteira especial para ruído apresentada na Figura 2. Para o segundo teste, deve-se ajustar a carga para 50% do valor nominal, realizar a medição da resistência e anotar na tabela. Repetir o procedimento com o novo valor de carga.

São realizados 3 testes para cada nível de tensão de entrada. Após os 3 testes, deve-se alterar a tensão para o valor indicado e repetir o procedimento apresentado acima.

Ao final dos testes, ainda é necessário realizar vários testes específicos que não podem ser obtidos com os dados da Tabela 1.

2.4. Soluções comerciais e trabalhos similares

Basicamente existem duas opções de soluções comerciais disponíveis no mercado que possibilitam realizar testes de desempenho em conversores e fontes chaveadas.

A primeira é composta de produtos especializados para testes automáticos de fontes e conversores estáticos. Tratam-se de soluções completas compostas de equipamentos especializados e normalmente controlados por software. Estes são equipamentos mais especializados e dedicados para ambiente de produção e de grande escala.

A segunda opção é a mais usual nos laboratórios da maioria das empresas de desenvolvimento: são diversos equipamentos genéricos que, quando combinados, são capazes de realizar todos os testes necessários. Como se trata de um conjunto de equipamentos não integrados, o seu uso exige um trabalho manual de montagem e muitas variações para adequar seus usos entre os diferentes testes.

2.4.1. Equipamentos genéricos

Conforme comentado anteriormente, esta abordagem de testes é mais facilmente encontrada nas empresas de tecnologia. A GE RTB utiliza esta estratégia como solução de testes de suas fontes. O desenvolvimento de fontes nesta unidade é feito em baixo volume, pois objetivam o uso próprio somente. Devido a este fato, não se justifica um investimento muito alto em soluções comerciais automáticas como as apresentadas na próxima seção.

Esta metodologia de testes envolve a utilização de diversos equipamentos de laboratório configurados de tal forma que proporcionem condição suficiente para a realização de cada teste.

- **Analisadores de potência**

Houve um tempo em que os analisadores de potência se limitavam à medição de potência, porém com o passar do tempo novas funcionalidades foram implementadas tornando-se um equipamento bastante completo e útil em diversos testes. Atualmente é possível encontrar equipamentos modernos como os da série PA2200 da Keysight capazes de unir funções de osciloscópio com as funções tradicionais de analisadores de potência. Este analisador ainda é capaz de executar análise de harmônicas, fator de potência, corrente de partida, todas as potências além de também permitir o cálculo da eficiência (KEYSIGHT, 2017).

Há também analisadores de potência portáteis como os da série 435 da Fluke. Um dos diferenciais dos analisadores desta série é que é possível incluir o custo da energia para que o equipamento calcule o custo com a energia consumida e também desperdiçada através da energia reativa. Além das funções básicas de analisadores de potência, este também permite o cálculo da eficiência de conversores estáticos (FLUKE, 2012).

- **Medidores de potência**

Os equipamentos mais antigos (também conhecidos como wattímetros) são equipamentos de construção eletrodinâmica e medem apenas potência ativa devido suas características construtivas (KASSICK et al., 2008). Equipamentos mais modernos são digitais e normalmente apresentam mais opções de medição. O medidor 66205 da Chroma é capaz de medir tensão, corrente, harmônicas, corrente de partida, fator de crista, frequência, fator de potência além das potências ativa, reativa e aparente.

Outra opção disponível no mercado é a série PW333x de medidores de potência da Hioki. O modelo PW3336 possui dois canais de medição independentes com ótima precisão de medição. O fato de possuir dois canais permitiria um ótimo *setup* de testes manuais para conversores pois seria possível monitorar entrada e saída ao mesmo tempo. Esta característica permite ao modelo calcular a eficiência do conversor através de uma função já implementada no equipamento. Outro diferencial é a possibilidade de medições trifásicas (HIOKI, 2013). Além da medição de eficiência, este modelo também realiza as medições citadas no equipamento 66205 da Chroma.

Um osciloscópio comum de bancada é suficiente para completar a lista de equipamentos desta categoria. Com seu uso são realizadas medições de ruído, resposta dinâmica à variação de carga, tempo de sustentação e demais medições relacionadas com tempo.

2.4.2. Sistemas de teste automático

Um sistema de teste automático (ATS – *Automatic Test System* ou ATE – *Automatic Test Equipment*) é formado por diversos instrumentos de medição, como os apresentados na seção anterior, que são arranjados e configurados para uma operação sincronizada regida por um software de controle. Trata-se de uma solução personalizada onde os equipamentos que compõem o ATS sejam os mais apropriados disponíveis pelo fabricante.

O ATS da Chroma (Figura 5) é uma composição de equipamentos modulares e configurados conforme as especificações de teste do produto a ser testado. Eles podem conter um ou mais dos seguintes equipamentos: carga eletrônica, analisador de ruído, fonte CA/CC, osciloscópio, multímetro, analisador de potência, sistema de controle, testador de curto circuito, controlador liga/desliga e ainda pode conter outros itens mediante solicitação. Com este conjunto de equipamentos, este sistema é capaz de realizar todos os testes considerados padrões da indústria de fontes chaveadas. Outro destaque da solução da Chroma está no seu software de controle que permite a operação do ATS sem necessidade de conhecimentos de programação (CHROMA, 2018).



Figura 5. Sistema de teste ATS modelo 8000 da Chroma. Fonte: (CHROMA, 2018)

Uma desvantagem deste tipo de equipamento é o elevado custo de aquisição. Foi realizada uma cotação de um ATS capaz de testar as fontes que se encontram no escopo desse trabalho, e o custo de investimento está entre 50 mil e 80 mil dólares a preço de importação, sendo que o preço nacionalizado pode chegar a 800 mil reais (OLIVEIRA, 2018).

Outro fabricante que possui uma solução de ATS é a NHResearch. A série S400 (Figura 6) é um pouco mais simples quando comparada com o ATS 8000 da Chroma, mas também fornece uma solução de teste personalizada e automática.



Figura 6. ATS NHRResearch S400. Fonte: (NR RESEARCH, 2018)

A série 400 pode ser equipada com fontes CC ou CA, cargas eletrônicas, analisadores de potência, todos controlados via software proprietário. O equipamento, apesar de mais simples, também consegue realizar a maioria dos testes típicos da indústria (NR RESEARCH, 2018).

Uma cotação também foi realizada com a NHRResearch de modo a obter uma estimativa de custo de aquisição de um ATS compatível com os requisitos de teste proposto no presente trabalho. De acordo com o fabricante, o modelo que melhor atende as características de testes é o S440 que custa na faixa dos 50 mil dólares para importação (GONÇALVES, 2018).

Vale ressaltar que esse tipo de equipamento, ATS, são bem indicados para linhas de produção pois podem fazer milhares de testes por dia.

2.4.3. Trabalhos similares

A linha de pesquisa de novas soluções de teste de fontes chaveadas é pouco explorada no meio acadêmico, provavelmente pelo fato de existirem diversos equipamentos no mercado capazes de executar as medições necessárias para os testes de fontes. Para realização dos testes, não há como fugir de medições fundamentais como tensão, corrente e tempo.

Estas soluções comerciais foram discutidas na seção anterior onde foi mostrado que existem soluções manuais e automáticas. Também foi visto que a solução automática é inviável financeiramente para a maioria das empresas e que a solução manual implica em um tempo de teste alto com possibilidade de erros de medição atrelados ao engenheiro.

Entretanto, alguns autores já desenvolveram trabalhos na área de automação de testes para fontes chaveadas. Teixeira Filho (2006), em sua dissertação de mestrado intitulada “Estação de testes e de geração de relatórios para uso em linha de produção de fontes chaveadas”, fez uma breve apresentação dos tipos de conversores com foco no conversor CA-CC, mais utilizado como fonte de alimentação. Também foram abordados o processo produtivo de fontes bem como os testes necessários para verificar os requisitos de qualidade apresentados pelas normas IEE 446⁶ e 399⁷. Após a caracterização e arquitetura da estação de teste, é apresentado o desenvolvimento do hardware e software. O hardware desenvolvido consiste de um módulo de potência e um módulo de processamento. O controle de carga é um projeto do autor, enquanto o sistema de aquisição é feito por módulos da *National Instruments* (NI). O software onde foi desenvolvida a interface homem-máquina (HMI – *Human-Machine interface*) foi desenvolvido em *Labview* – software de automação da NI. O software permite a configuração dos parâmetros de teste e possui geração de relatório com avaliação de desempenho do tipo *Pass/Fail*. Segundo o autor, o protótipo apresentou resultados satisfatórios, podendo ser comparado às soluções comerciais. Os testes realizados pela estação são limitados realizando apenas verificação dos limites de tensão de entrada, regulação de carga e teste de curto-circuito. O autor sugere uma ampliação de seu trabalho visando adicionar mais testes.

Outro projeto similar foi desenvolvido por Rodrigues (2009) cujo título é “Jiga automática para testes de fonte chaveadas”. Jiga é um termo comum no ambiente industrial que caracteriza um equipamento ou uma estrutura desenvolvida para facilitar a execução de testes. O autor visa a construção de um equipamento para validação das fontes chaveadas utilizadas na Digitel S/A Indústria eletrônica. O equipamento desenvolvido é capaz de medir tensão de saída, realizar a regulação de carga (inclusive dinâmica) e regulação de linha. O autor explica cada teste bem como o procedimento manual utilizado na empresa. Para o desenvolvimento da jiga o autor dividiu o trabalho em dois módulos: potência e controle. Para o módulo de potência, o autor desenvolveu uma fonte de corrente e um resistor do tipo *shunt* para medição da corrente. Já o módulo de controle faz uso de um kit microcontrolado com processador ARM7 da NXP (LPC2378). A comunicação entre a jiga e o computador é serial RS232. O software de controle

⁶ Norma com práticas recomendadas para sistemas de emergência e sustentação de aplicações industriais e comerciais.

⁷ Norma com requisitos de isolamento através de aplicação de impulsos de tensão.

foi adaptado baseado em uma plataforma da Digitel. Ensaios foram realizados e os resultados foram considerados aceitáveis e dentro dos requisitos especificados.

Oliveira (2012), em sua monografia “Jiga automática para testes de conversores chaveados”, traz um comparativo entre fontes lineares e fontes chaveadas detalhando brevemente as topologias mais tradicionais da literatura. O autor detalha cada um dos módulos desenvolvidos na fabricação da jiga: módulo de entrada, painel de controle, carga eletrônica, placa de comutação, caixa de controle e rack. O módulo de entrada faz a interface entre as conexões de alimentação e medições de tensão e corrente da entrada da fonte sob teste e, também, permite fazer algumas configurações de modos de operação dependendo do tipo de conversor ou teste que se deseja realizar. O painel de controle (Figura 7) permite a programação de até 85 programas de teste e também apresenta mensagens de instrução durante a realização dos ensaios. A carga eletrônica é um módulo que possui dois circuitos de carga com ajuste manual através de potenciômetro. A placa de comutação faz a lógica de acionamento de carga, polaridade, curto circuito e conecta os instrumentos de medição de tensão e corrente. Este módulo permite a conexão de até duas saídas simultaneamente. A caixa de controle é a estrutura que abriga o módulo de entrada e o painel de controle enquanto o rack fica responsável pelos módulos de potência como cargas eletrônicas, placas de comutação e ajuste de corrente das cargas eletrônicas. O projeto desenvolvido por Oliveira (2012) realiza todos os testes somente com tensão CC na entrada do conversor. Vale também ressaltar que em seu projeto, ainda são necessários os mesmos equipamentos de medição necessários para uma rotina de teste manual com exceção da carga eletrônica. Mesmo com essa característica, o autor revela que a implantação da sua jiga otimizou bastante as atividades do dia a dia de sua empresa.



Figura 7. Painel de controle. Fonte: (OLIVEIRA, 2012)

Os trabalhos acima descritos foram desenvolvidos para o ambiente de produção de fontes chaveadas enquanto que o trabalho, aqui descrito, objetiva melhorar o ambiente de desenvolvimento destas fontes. O escopo de testes normalmente é reduzido no ambiente de produção e os resultados dos testes normalmente são do tipo *pass/fail*. A solução aqui apresentada possui um escopo de testes bem mais extenso e apresenta os resultados de cada teste de forma detalhada, permitindo que o engenheiro tenha uma boa compreensão do desempenho da fonte.

Não foi encontrado nenhum trabalho similar no sentido de modificação de um registrador de perturbação para realização de testes de fontes chaveadas. Na verdade, não foram encontradas publicações sobre qualquer tipo de modificação de registradores de perturbação para desempenhar outra função.

Uma pesquisa de patentes relativa ao desenvolvimento de equipamentos para testes de fontes chaveadas utilizando registradores de perturbação também foi realizada mostrando que não há registros. Também foram procurados registros de qualquer modificação desse tipo de equipamento que objetivasse uma função ou aplicação diferente da sua concepção original e o resultado também foi nulo.

3. REGISTRADORES DE PERTURBAÇÃO

Um registrador de perturbação é um dispositivo eletrônico capaz de armazenar sinais de tensão, corrente e estados digitais quando algum evento é identificado. Eventos são condições estipuladas durante a configuração do equipamento e que normalmente estão associadas à alguma falha ou condição limite de operação. Alguns exemplos de condições que podem gerar eventos são listados a seguir:

- Medição de tensão e/ou corrente excede o limite configurado;
- Mudança de estado de alguma entrada digital. É possível definir uma lógica entre canais digitais;
- Valor de grandeza (potência aparente, valor RMS, frequência, THD, etc.) calculada excede limite configurado.

Quando uma perturbação é identificada, todos os estados dos sinais digitais e medições analógicas são armazenadas na memória do equipamento e podem ser enviados para centrais de controle para análise.

A seguir são apresentados os circuitos que permitem a medição (entradas analógicas) e atuação (saídas binárias) de um registrador de perturbação.

3.1. Saídas binárias

Saídas binárias (ou digitais) são circuitos que funcionam como interruptores. Uma saída digital possui dois estados: aberto ou fechado e, por isso também é comumente denominada saída binária. Outra terminologia bastante usada é contato. Quando seu estado é aberto significa que não há possibilidade de condução de corrente entre os dois terminais do canal, ou seja, é um circuito aberto. Quando fechado, tem-se idealmente um curto circuito entre os terminais, logo há possibilidade de condução de corrente.

Um canal de saída digital pode ser usado como sinal de alarme, acionando algum tipo de lâmpada ou LED ou também para acionar alguma carga como um solenoide, por exemplo. Outras aplicações incluem o uso como forma de acionamento de entradas digitais de outros equipamentos podendo assim dar início à alguma lógica de controle.

Existem diferentes tipos de saídas digitais, dependendo do componente empregado no circuito que pode ser um relé, um IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*) ou misto. Canais de saída a relé (também conhecido como contato seco) são bastante comuns pois fornecem boa isolamento e capacidade de corrente. Outra vantagem é sua capacidade de acionar cargas de corrente alternada. Uma desvantagem deste tipo de saída é a típica dificuldade de suportar a interrupção de cargas indutivas. Quando uma carga indutiva é interrompida, gera-se um aumento na corrente (devido sua característica indutiva) que normalmente danifica o relé permanentemente. Outra desvantagem reside na característica mecânica do relé, que apresenta tempo de acionamento relativamente alto.

Canais a IGBT, ou qualquer outro componente de função similar, apresentam boas soluções quando há necessidade de um acionamento muito rápido, porém com capacidade de corrente relativamente baixa. Também conhecido como contato molhado, permite o acionamento de cargas indutivas pois a construção do componente é puramente eletrônica.

Já na concepção de saída digital mista, tem-se o melhor de cada um dos tipos. Um canal digital é dito misto quando possui um relé e um IGBT associados em paralelo. Dessa forma

consegue-se criar uma lógica de acionamento capaz de aproveitar o melhor de cada componente. O IGBT é utilizado para os momentos de transição onde há necessidade de resposta rápida e também onde podem ocorrer variações bruscas de corrente, enquanto o relé opera durante o restante do tempo onde oferece melhor desempenho.

3.2. Entradas analógicas

As entradas analógicas são circuitos de medição de grandezas analógicas como tensão ou corrente. Um canal é composto basicamente por um circuito de filtro analógico, condicionamento de sinal e um conversor analógico-digital (*Analog-to-digital converter* ou ADC). O filtro elimina os ruídos (componentes de frequência não desejáveis) deixando passar apenas o sinal desejado. A próxima etapa é a adequação do sinal para aproveitar ao máximo a capacidade do ADC. Esta adequação modifica o nível de tensão para a mesma ordem de grandeza da entrada do ADC. O ajuste deve ser feito para que toda a faixa de tensão que se deseja medir fique dentro da faixa de medição (fundo de escala) do conversor. O ADC faz a conversão e envia as medições à unidade de processamento do equipamento. O funcionamento detalhado do ADC, bem como suas diversas topologias possíveis não serão abordados neste trabalho.

3.3. Registrador de perturbação DR60

DR60 é o mais novo registrador de perturbação da linha de registradores Reason da GE. Este registrador (Figura 8) possui design compacto, porém robusto e com boa capacidade de aquisição e velocidade.



Figura 8. Registrador de perturbação GE modelo DR60. Fonte: http://www.gegridsolutions.com/measurement_recording_timesync/images/DR60-group.jpg

O DR60 pode ser customizado no momento da compra para até 32 canais analógicos de tensão e/ou corrente, até 96 entradas digitais ou 48 saídas digitais. O registro de perturbação dos canais analógicos possui taxa de aquisição de 512 amostras por ciclo (GE GRID SOLUTIONS, 2017).

A seguir são detalhados os circuitos de saída binária e aquisição analógica presentes no DR60. Outras características presentes no registrador são fundamentais para sua aplicação usual, porém não são relevantes ao trabalho e, portanto, não serão apresentadas.

3.3.1. DR60 Saídas binárias

As saídas digitais utilizadas no DR60 são todas a relé. Sua função dentro deste trabalho é controlar a aplicação de tensão na entrada do conversor sob teste e também a aplicação de carga. Para isto são utilizados 4 canais digitais, 2 para a entrada do conversor e 2 para o controle da carga. O objetivo de usar 2 canais para cada circuito é aumentar a segurança do equipamento evitando a necessidade de polarização da conexão à rede.

As especificações das saídas binárias do equipamento são as seguintes:

Tabela 2. Especificações das saídas digitais do DR60. Fonte: (GE GRID SOLUTIONS, 2017)

Característica	Saídas digitais
Corrente máxima contínua	5 A
Tensão máxima	300 V
Isolação	1000 V rms
Corrente máxima (1 s)	30 A

3.3.2. DR60 Entradas analógicas

O DR60 possui dois tipos de entrada analógica: tensão e corrente. O circuito das duas é basicamente o mesmo, a diferença é que o de corrente possui um resistor do tipo shunt, onde é feita a medição de tensão – que é proporcional a corrente. Resistores shunt são resistores de resistência bem pequena e de alta precisão. São desenvolvidos especialmente para aplicações onde é necessário medir corrente (ANDERSON; BRUNNER; ENGLER, 2003). O resistor é inserido em série com o circuito ao qual se deseja medir a corrente. Como todo resistor, haverá uma queda de tensão entre os terminais do shunt que será proporcional à corrente e determinada pela Lei de OHM, representada na equação 3.

$$V = R \cdot I \quad (3)$$

Dois canais de corrente do modelo de placa de maior precisão do DR60 serão usados para medir as correntes de entrada e saída (quando houver carga). As especificações destas entradas de corrente são apresentadas a seguir:

Tabela 3. Especificação entradas de corrente DR60. Fonte: (GE GRID SOLUTIONS, 2017)

Característica	Placa analógica de precisão
Corrente nominal	1 e 5 A
Faixa de medição	5 mA – 10 A
Precisão	Classe 0,1 (IEC61869-2) <0,1% do fundo de escala
Resistência	15 mΩ
Corrente contínua de sobrecarga	16 A
Isolação entre canais	>3,5 kV

De forma similar, 2 canais de tensão são usados para medir a tensão de entrada e saída do conversor sob teste. As especificações dos canais de tensão são apresentadas a seguir:

Tabela 4. Especificações entrada de tensão DR60. Fonte: (GE GRID SOLUTIONS, 2017)

Característica	Placa analógica de precisão
Tensão nominal	115 V
Faixa de medição	0,11 V – 230 V
Precisão	Classe 0,1 (IEC61869-2) <0,1% do fundo de escala
Impedância	>420 kΩ
Tensão contínua de sobrecarga	230 V
Isolação entre canais	>3,5 kV

O circuito responsável pela conversão dos sinais analógicos para digitais (ADC) possui resolução máxima de 16 bits, fundo de escala de 320 mV e comunicação de até 20 MHz. O circuito de condicionamento de sinais é composto por filtro passa baixa e um divisor resistivo de alta precisão. O fator de conversão do divisor resistivo é de $\frac{7}{7507}$, o que possibilita medições de até 343 V cc.

A taxa de amostragem dos circuitos analógicos do DR60 varia de 256 a 512 pontos por ciclo, configurável pelo usuário. Considerando a maior taxa de amostragem, tem-se a frequência de amostragem de 30722 Hz.

A precisão do DR60 está dentro da classe 0,1 de precisão. Isso significa dizer que os valores obtidos através dos canais analógicos da placa de precisão apresentam erro menor ou igual a 0,1 por cento nas medições da tensão nominal. Valores abaixo ou acima da nominal podem apresentar erros maiores.

Os valores de tensão obtidos através desta placa durante o protótipo variam de 12 a 310 V cc. A precisão permitida pela norma nos extremos dessa faixa de medição é de até 0,4 %. Os resultados oficiais de precisão de medição são apresentados a seguir.

A Tabela 5 apresenta os resultados das medições de tensão.

Tabela 5. Precisão das medições de tensão do DR60. Fonte: (Cortesia GE)

Referência (V)	Canal A (%)	Canal B (%)	Canal C (%)	Canal D (%)	Erro Médio (%)
5,75	0,139	0,139	0,139	0,139	0,139
23,00	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
115,00	0,010	0,010	0,003	0,003	0,0082
138,00	0,011	0,001	0,001	0,001	0,0035

O mesmo tipo de teste foi realizado para as medições de corrente e os resultados são disponibilizados na Tabela 6.

Tabela 6. Precisão das medições de corrente do DR60. Fonte: (Cortesia GE)

Referência (A)	Canal A (%)	Canal B (%)	Canal C (%)	Canal D (%)	Erro Médio (%)
0,250	0,160	0,160	0,120	0,120	0,140
1,00	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
5,00	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
6,00	0,008	0,002	0,008	0,002	0,005

Ambos os resultados oficiais mostram que a placa analógica de precisão atende os requisitos de classe 0,1 para tensão e corrente.

3.4. Software *Analise*

O *Analise* foi desenvolvido pela Reason Tecnologia para visualização e análise de registros oscilográficos gerados pelos registradores de perturbação. O programa aceita arquivos no formato *COMTRADE* de acordo com a norma IEEE C37.111 e também arquivos proprietários de equipamentos antigos Reason (REASON TECNOLOGIA S.A., 2005).

COMTRADE é um tipo de arquivo que possui um formato específico para transferência de formas de onda e eventos coletados de sistemas de potência. Esse formato foi criado de modo a permitir a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes empresas (IEEE, 1999).

Quando um arquivo *COMTRADE* é importado no *Analise*, ele é decodificado de acordo com a padronização definida pela mesma norma que definiu a codificação. É justamente esta característica que tem tornado possível a interação entre equipamentos de fabricantes distintos no setor de energia elétrica.

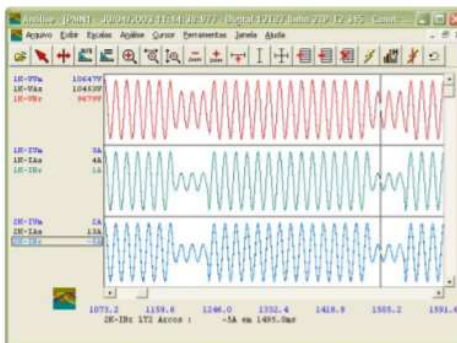


Figura 9. Software *Analise*. Fonte: (REASON TECNOLOGIA S.A., 2005)

Além de exibir as formas de onda, o programa conta com ferramentas de “zoom”, posicionamento de cursores, sobreposição de grandezas no mesmo gráfico além de várias rotinas de cálculos implementadas diretamente no software. Também é possível visualizar sequência de eventos e disparos e estado das portas digitais.

Com uma boa estratégia de aquisição de dados e sequência de eventos, é possível obter a maioria dos resultados dos testes propostos através de manipulação dos cursores presentes no software. Também é possível exportar todos os pontos das formas de onda em formato Excel e ASCII.

Apesar do software possuir funções matemáticas que permitem realizar cálculos sobre os valores obtidos dos arquivos *COMTRADE*, neste trabalho somente serão utilizados os

resultados de cálculo do próprio DR60. O *Análise* é utilizado para exibir as formas de onda e seus cursores são usados para obter medições relativas entre dois instantes de tempo diferentes.

Escolheu-se não utilizar os resultados de cálculo do software pois estes apresentam maior incerteza quando comparado aos resultados realizados pelo DR60.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO E DA NOVA METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO COM DR60 MODIFICADO

O protótipo foi pensado para ser de fácil preparação e manuseio. Tais características estão diretamente alinhadas com pelo menos um dos objetivos desse trabalho: Reduzir o tempo total de testes de bancada durante a fase de desenvolvimento.

Dessa forma, optou-se por utilizar o hardware e as funções já implementadas no equipamento DR60 como forma de automatizar o processo de aquisição de dados. Apesar de já possuir funções de medição, o equipamento as utiliza de acordo com a lógica implementada, ou seja, de acordo com o que se espera de um registrador de perturbação digital.

Essas funções podem ser acessadas diretamente através de comandos enviados ao sistema operacional do equipamento. Com base nessa característica do DR60, e demais equipamentos industriais, foi desenvolvido um *script* capaz de enviar esses comandos. Esse acesso é restrito e somente pode ser realizado pelos engenheiros envolvidos no projeto.

O *script* é responsável pela implementação da lógica do teste, porém, a lógica também depende de como os circuitos são interligados nos conectores do protótipo. Essas conexões elétricas devem ser bem planejadas de modo a evitar aquecimento de cabos, medições com ruído indesejado e erros de medição devido quedas de tensão.

Com base nessas informações, decidiu-se por realizar as conexões diretamente nos conectores do equipamento, utilizando cabos curtos e de bitola apropriada. Qualquer outra configuração poderia resultar em uma solução esteticamente mais atraente ou até mais intuitiva, porém a qualidade da medição seria impactada negativamente.

Além das modificações implementadas para possibilitar o DR60 essa nova funcionalidade, também foram criados procedimentos de como devem ser feitos os testes. Os procedimentos foram divididos em aquisição de dados, leitura e análise.

4.1. Configuração do DR60

Um registrador de perturbação possui diversas funcionalidades. Muitas delas são configuráveis para permitir que cada cliente personalize o equipamento conforme sua aplicação. No caso do presente trabalho não é diferente. A configuração do equipamento é necessária para selecionar quais canais estão sendo usados assim como o ajuste das características dos registros de gravação.

O processo de configuração só necessita ser realizado uma vez para que passe a operar corretamente com o *script* desenvolvido. A configuração é feita através do software “*DR60 Configurator*”, software desenvolvido especificamente para desempenhar esta função.

A configuração necessária acontece na aba de registro, que é dividida em 5 grupos: registro de curta duração, registro de longa duração, registro de longa contínuo, tendência e sequência de eventos. Os registros de curta duração são registros realizados com maior taxa de amostragem e menor duração. Os registros de longa duração possuem menor taxa de amostragem, porém registram períodos de tempo maiores.

Para o presente trabalho, apenas os registros de longa e curta necessitam ser configurados. A configuração desses registros permite definir detalhes do *trigger*, tempo máximo de duração do registro além da taxa de amostragem.

Após esta configuração via *DR60 Configurator*, inicia-se outra etapa de preparação do protótipo que envolve a instalação do *script* e demais arquivos de lógica no protótipo. Esse procedimento é realizado copiando os arquivos para o diretório interno do DR60: *config/logicas*.

Para que o equipamento permita a execução do *script*, faz-se necessário atualizar a chave associada com a licença do equipamento, esta chave é chamada de *hash*. Para esta atualização basta copiar o *hash* gerado (dentro do arquivo *logic.st*) após a configuração do DR60 e substituir as existentes nos arquivos de lógica.

Esse processo de atualização do *hash* só necessita ser realizado após uma modificação de configuração do DR60. Durante o uso do equipamento dificilmente será necessário alterar a configuração.

4.2. Script

O *script* foi desenvolvido utilizando linguagem Shell. O código faz uso de algumas funções já implementadas no código do DR60 e funciona enviando parâmetros e comandos diretamente ao sistema operacional (SO) embarcado no equipamento.

Além do código principal, também são utilizados arquivos auxiliares onde são descritos os parâmetros que serão enviados ao SO. Ao total são utilizados 5 arquivos deste tipo. Cada arquivo possui os comandos que definem os estados das saídas digitais.

A rotina principal começa ativando a aquisição de medições no padrão *COMTRADE* de acordo com os parâmetros configurados no equipamento. Isso significa que todas as medições aferidas durante o teste serão gravadas no formato *COMTRADE* e poderão ser analisadas posteriormente através do software *Analise* da GE.

O primeiro passo do *script* é garantir que todas as saídas binárias estão desligadas. Para isso, é enviado um comando que faz com que os contatos das saídas fiquem abertos. Após isso é dado um comando para iniciar a aquisição, e, então, aguarda-se meio segundo para aplicar tensão na entrada da fonte sob teste. Este tempo permite obter uma referência de medição quando não há nenhuma tensão e corrente sendo medida, somente o ruído de medição.

Nesta etapa a fonte está funcionando em modo *stand-by* pois não foi acionado o circuito que conecta a carga. Ela permanece neste estado por 2 segundos para garantir estabilização e boa quantidade de medições.

O próximo passo é acionar a carga enviando um comando para acionar as saídas binárias que fecham os contatos ligados a carga. A carga é definida unicamente pela resistência conectada nos terminais de carga do protótipo. A fonte permanece ligada e com carga por mais 2 segundos.

O último estágio consiste em remover apenas a alimentação da fonte, mantendo a carga conectada. Esta situação simula uma falta de energia e visa verificar o tempo de sustentação da fonte. Esta etapa dura 2,5 segundos, tempo mais que suficiente para o teste.

O diagrama de blocos que representa as etapas macro de funcionamento do *script* é apresentado na Figura 10.

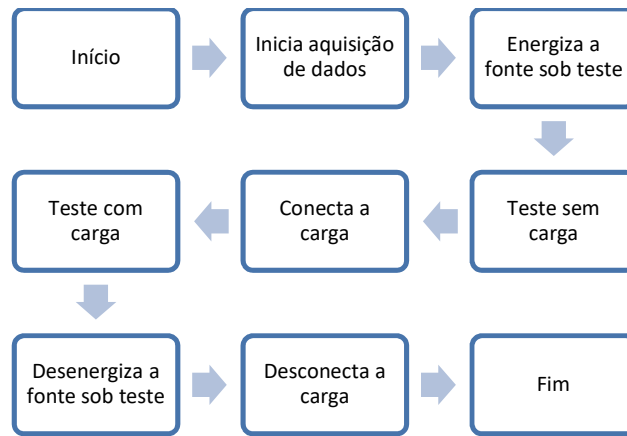


Figura 10. Diagrama de blocos do *script* implementado no protótipo do DR60. Fonte: Próprio autor

Com esta rotina de teste, é possível provocar todas as condições necessárias para os testes listados na seção 2.2.

O código do *script* encontra-se no Apêndice A, juntamente com um detalhamento mais técnico do seu funcionamento.

4.3. Conexões elétricas

As conexões elétricas são responsáveis por interligar os circuitos de saída digital e entrada analógica de modo a permitir que o *script* execute a leitura e a atuação dos circuitos conforme sequência correta.

O diagrama elétrico desenhado para o protótipo é apresentado nas Figuras 11 e 12. Os canais de medição de corrente são representados pelo símbolo de um amperímetro – círculo com a letra A. De forma similar, os canais de medição de tensão são representados pelo círculo com a letra V – Símbolo do voltímetro.

Os números de 1 a 5 presentes na Figura 11, e os números de 6 a 10 da Figura 12, são marcações para facilitar a identificação das conexões elétricas apresentadas na Figura 13.

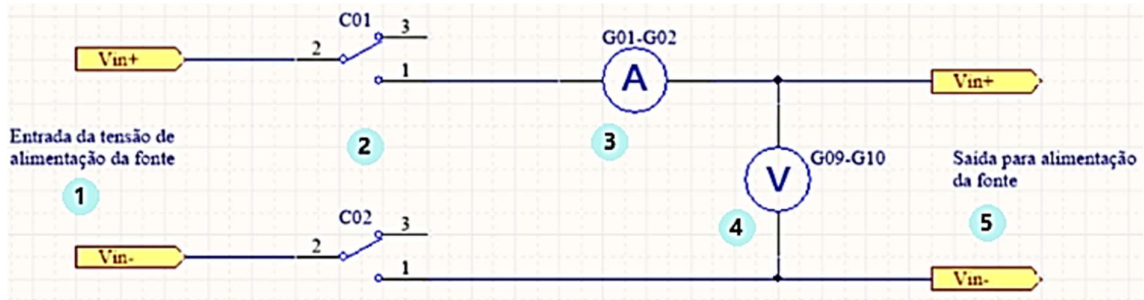


Figura 11. Diagrama elétrico da entrada da fonte sob teste. Fonte: Próprio autor

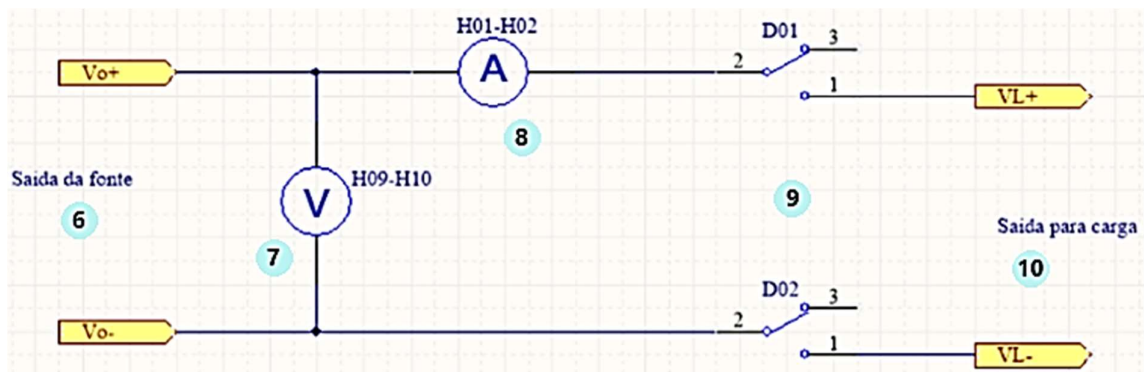


Figura 12. Diagrama elétrico da saída da fonte sob teste. Fonte: Próprio autor

A Figura 13 mostra o resultado da implementação no protótipo. As conexões foram feitas da melhor forma possível para facilitar a operação e aumentar a precisão das medições.

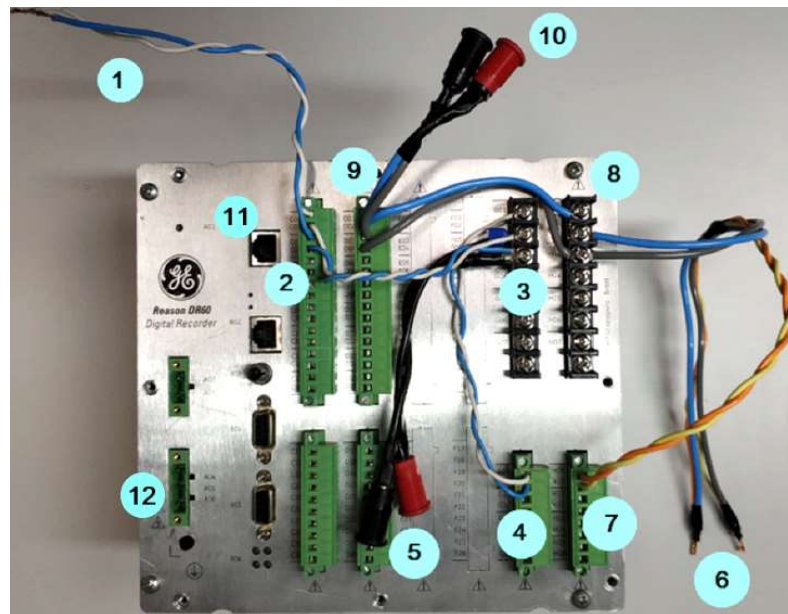


Figura 13. Painel traseiro do DR60 com as conexões elétricas instaladas. Fonte: Próprio autor

A seguir são detalhadas as conexões de acordo com as marcações da Figura 13.

1. Entrada de tensão da alimentação da fonte;
2. Contatos da saída binária C01 e C02. Contatos da entrada da fonte;
3. Medição de corrente da entrada. São utilizados os canais G01 e G02;
4. Medição da tensão da entrada. São utilizados os canais G09 e G10;
5. Saída para alimentação da fonte;
6. Saída da fonte;
7. Medição de tensão da saída. São utilizados os canais H09 e H10;
8. Medição da corrente da saída. São utilizados os canais H01 e H02;
9. Contatos da saída binária D01 e D02. Contatos da saída da fonte;
10. Saída para a carga;
11. Conexão de rede ethernet RJ45;
12. Alimentação do DR60.

A parte mais crítica dessa montagem está na conexão de maior fluxo de corrente: circuito de saída da fonte (6-8-9-10 apresentados na figura 13). São utilizados cabos com secção 2,5mm e com menor comprimento possível. Dessa forma, é possível minimizar as quedas de tensão geradas pela alta corrente de saída.

Outro detalhe importante da montagem está na conexão da medição de tensão de saída que é feita por um cabo independente que vai direto da saída da fonte até o canal de tensão do DR60. O cabo é dito independente porque não deriva do cabo de corrente. Dessa forma, a medição da tensão não sofre influência da queda de tensão causada por correntes altas.

4.4. Procedimento de aquisição de dados do teste

A concepção do protótipo permite uma metodologia bastante simplificada e de fácil reprodução. Apenas 3 equipamentos auxiliares são necessários: Fonte CA ou CC (conforme teste da fonte), uma carga resistiva ou eletrônica e um computador.

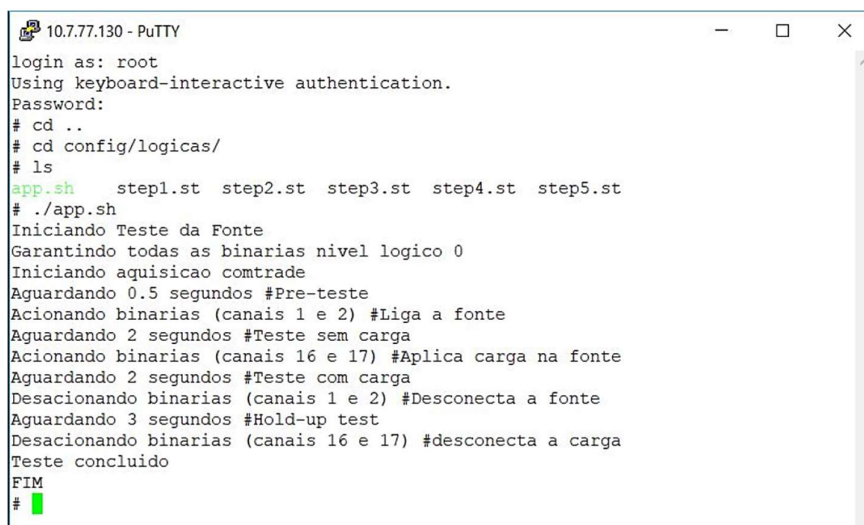
O primeiro passo é ajustar a fonte auxiliar e a carga de acordo com a intenção do teste e características da fonte a ser testada. Conectam-se todos os cabos apropriadamente, atentando-se para que a tensão de teste seja adequada à fonte a ser testada, pois não há nenhuma proteção

para o caso de aplicar tensão maior que a máxima permitida. Outro ponto de atenção é utilizar sempre cabos de bitola compatível com a corrente e também utilizar conectores apropriados.

O computador deve ser colocado na mesma rede do equipamento utilizando IP fixo e conectado ao equipamento através do cabo RJ45 usando sempre a porta 1 do equipamento. Antes de iniciar o teste, conferir todas as ligações e verificar se a fonte auxiliar está ligada.

O próximo passo é acessar o equipamento através de qualquer terminal SSH usando usuário e senha. Então basta iniciar o *script* de nome “app.sh” que se encontra na pasta “logicas” e aguardar os 7 segundos de teste. A Figura 14 mostra todos os comandos necessários para iniciar o *script* e também as mensagens que aparecem durante a execução da aquisição.

Assim que o teste acaba, já estão disponíveis os dois arquivos *COMTRADE* – um registro de longa e outro registro de curta. Caso uma sequência de testes com diferentes cargas ou níveis de tensão de entrada seja necessária, basta fazer os ajustes no *setup* e executar o *script* novamente. Repetir o processo até terminar todos os testes. É recomendado ir copiando e salvando os arquivos *COMTRADE* conforme vão sendo gerados para uma pasta no computador.



```
10.7.77.130 - PuTTY
login as: root
Using keyboard-interactive authentication.
Password:
# cd ..
# cd config/logicas/
# ls
app.sh  step1.st  step2.st  step3.st  step4.st  step5.st
# ./app.sh
Iniciando Teste da Fonte
Garantindo todas as binarias nivel logico 0
Iniciando aquisicao comtrade
Aguardando 0.5 segundos #Pre-teste
Acionando binarias (canais 1 e 2) #Liga a fonte
Aguardando 2 segundos #Teste sem carga
Acionando binarias (canais 16 e 17) #Aplica carga na fonte
Aguardando 2 segundos #Teste com carga
Desacionando binarias (canais 1 e 2) #Desconecta a fonte
Aguardando 3 segundos #Hold-up test
Desacionando binarias (canais 16 e 17) #desconecta a carga
Teste concluido
FIM
# █
```

Figura 14. Terminal SSH contendo todos os comandos e mensagens de um teste. Fonte: Próprio autor

Este é o processo de aquisição dos dados. Porém, ainda é necessário abrir os arquivos *COMTRADE* no software *Analise* para realizar as medições das grandezas e inserir no documento Excel para obter o resultado de todos os testes e o relatório. Estas etapas são detalhadas nas próximas seções.

4.5. Procedimento de leitura

O procedimento de leitura refere-se ao acesso dos dados obtidos durante a etapa de aquisição. Conforme exposto na seção anterior, o resultado da aquisição de dados é um conjunto de arquivos *COMTRADE* com todas as formas de onda de tensão e corrente de todos os diferentes testes realizados.

De posse de todos os arquivos *COMTRADE* gerados na etapa de aquisição de dados, basta abrir o arquivo desejado com o duplo clique sobre o mesmo, ou então, fazer a importação do *COMTRADE* através da opção “*Import COMTRADE...*” presente no menu “*File*”.

4.6. Procedimento de análise e relatório

A interpretação dos dados é feita utilizando duas ferramentas disponíveis no programa *Analise*. A primeira ferramenta são os cursores. O *Analise* possui dois cursores “*anchor*” e “*vertical bar*”. Como o nome sugere, o cursor “*anchor*” funciona como uma âncora e será utilizado sempre que for necessário a medição de uma diferença de tempo ou de magnitude de algum sinal. O cursor “*vertical bar*” pode ser utilizado isoladamente e será utilizado em todos os procedimentos de análise.

A outra ferramenta é o “*zoom*”. Estão disponíveis opções de “*zoom*” vertical e horizontal. O “*zoom*” vertical possibilita ajustar uma melhor visualização das formas de onda e também identificar grandezas de pequena magnitude. De maneira similar, o “*zoom*” horizontal permite também ajustar a visualização e é fundamental na medição temporal exigida por alguns testes, como o *hold-up time*.

Com o “*zoom*” corretamente ajustado e os cursores posicionados, basta fazer a leitura da magnitude das grandezas na lateral esquerda ou da diferença de tempo na parte inferior do software. A Figura 15 mostra um exemplo de análise do teste de tempo de partida da fonte.

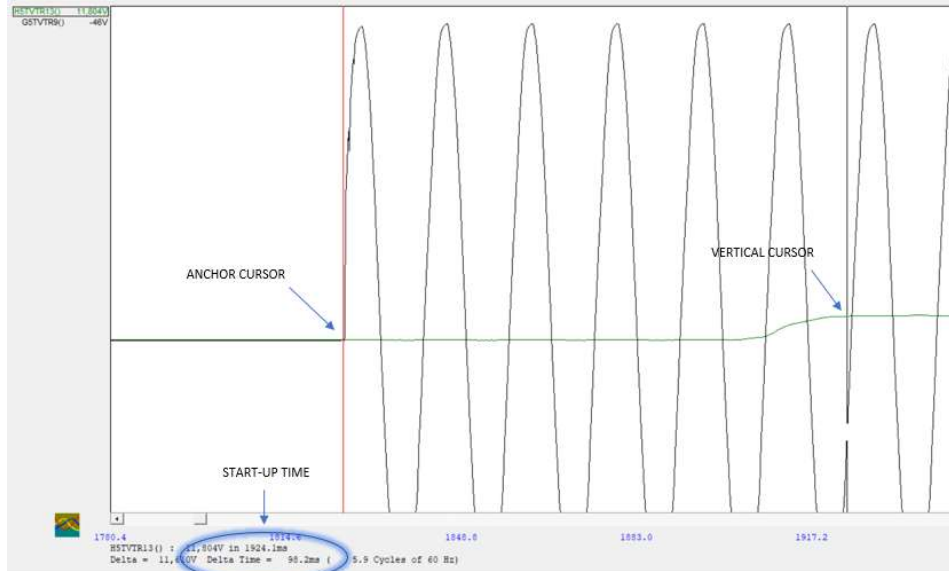


Figura 15. Exemplo de análise - medição do tempo de partida (start-up time). Fonte: Próprio autor

Os dados obtidos no software *Análise* são então inseridos na planilha de cálculo e relatório. O preenchimento da planilha deve ser feito somente na aba correspondente ao tipo de conversor: CC-CC ou CA-CC. Primeiramente são inseridas as informações de projeto do conversor, de acordo com seu tipo, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Planilha de cálculo - Tabelas de especificação de conversores. Esquerda: CC-CC, direita: CA-CC. Fonte: Próprio autor

POWER SUPPLY SPECIFICATION		POWER SUPPLY SPECIFICATION	
POWER SUPPLY MODEL:		POWER SUPPLY MODEL:	
SERIAL NUMBER:	-	SERIAL NUMBER:	-
INPUT VOLTAGE - TEST 1:	V cc	INPUT VOLTAGE - TEST 1:	V ca
INPUT VOLTAGE - TEST 2:	V cc	INPUT VOLTAGE - TEST 2:	V ca
OUTPUT VOLTAGE:	V cc	INPUT VOLTAGE - TEST 3:	V cc
OUTPUT POWER:	W	OUTPUT VOLTAGE:	V cc
		OUTPUT POWER:	W

Na especificação também são definidas as tensões de teste, duas opções no caso de conversores CC-CC e três para conversores CA-CC. O conversor CA-CC possui uma tensão a mais de teste pois ele é normalmente testado com alimentação de 125 V cc. O preenchimento correto da especificação é importante, pois esses dados serão automaticamente inseridos no relatório ao final do processo.

Na sequência ocorre o preenchimento dos dados obtidos no software *Análise*, conforme citado anteriormente. A tabela onde os dados devem ser inseridos é apresentada na Tabela 8

para conversores CA-CC e Tabela 9 para conversores CC-CC. Somente as células em branco devem ser preenchidas.

Tabela 8. Planilha de cálculo – Tabela com os resultados das medições CA-CC. Fonte: Próprio autor

		Measurements										
		Disturbance						Fault				
Nominal Load	Nominal Voltage (V)	Input Voltage (V)	Input Current (A)	Output Voltage (V)	Output Current (A)	Phase Displacement	THD (%)	Hold-up Time (ms)	Load Transient Response (ms)	Start-up Time (ms)	Inrush Current (A)	Peak Input Current (A)
0%	0				na	na	na	na	na	na	na	na
50%	0											
100%	0									na	na	
0%	0				na	na	na	na	na	na	na	na
50%	0											
100%	0									na	na	
0%	0				na	na	na	na	na	na	na	na
50%	0					na	na					na
100%	0					na	na			na	na	na

Tabela 9. Planilha de cálculo – Tabela com os resultados das medições CC-CC. Fonte: Próprio autor

		Measurements									
		Disturbance					Fault				
Nominal Load	Nominal Voltage (V)	Input Voltage (V)	Input Current (A)	Output Voltage (V)	Output Current (A)	Hold-up Time (ms)	Load Step Response (ms)	Start-up Time (ms)	Inrush Current (A)		
0%	0					na	na	na	na	na	
50%	0										
100%	0							na	na		
0%	0					na	na	na	na	na	
50%	0										
100%	0							na	na		

As planilhas de preenchimento possuem várias indicações de como os dados devem ser extraídos do software *Analise*.

Após o preenchimento da tabela respectiva ao teste, já é possível salvar o relatório com todos os resultados dos testes realizados. O relatório encontra-se na aba de planilhas com o nome respectivo ao tipo de conversor. Dois exemplos de relatório são apresentados nos Apêndices B e C.

4.7. Detalhamento de como os testes adicionais são calculados na planilha

Conforme citado anteriormente, foi desenvolvida uma planilha de cálculo e geração de relatório para auxiliar na tradução dos dados obtidos pelos arquivos *COMTRADE* para o resultado do teste propriamente dito.

A maioria dos resultados são obtidos da mesma forma que no teste manual, porém alguns testes não podiam ser realizados manualmente devido falta de equipamento no

laboratório. Esta seção visa mostrar como cada um destes testes adicionais é calculado pela planilha.

Verificação das potências

A verificação das potências está associada com a capacidade de medir adequadamente o fator de potência para determinar a componente reativa da potência de entrada. O fator de potência é determinado conforme apresentado a seguir.

Fator de potência

Para o cálculo do fator de potência, foi utilizado o método que leva em consideração a defasagem angular entre tensão e corrente e também o fator de distorção da forma de onda da corrente. Segundo Das e Sudhakar (2018), o fator de potência pode ser expresso através da equação

$$Fator\ de\ potencia = \frac{\cos \theta}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (4)$$

onde $\cos \theta$ é a defasagem angular entre a tensão e a corrente e o outro termo é a componente atrelada à distorção da forma de onda.

THD

A medição da distorção harmônica total é obtida diretamente como parte das funções nativas do DR60. A sua apresentação no *COMTRADE* de longa duração é dada em função do tempo, assim como as demais medições.

Eficiência

Conforme discutido na seção 2.2.4, o teste de eficiência realizado utilizando a metodologia atual de testes é bem limitado. Somente é possível fazer a medição correta quando o conversor é alimentado com CC.

Pelo fato de o DR60 realizar a medição do fator de potência, foi possível determinar a potência real na entrada do conversor e, portanto, determinar a eficiência em qualquer condição de tensão de alimentação.

5. ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A parte experimental do trabalho visa avaliar o desempenho do DR60 em executar a aquisição de dados de testes funcionais quando comparado com o método atual de teste. Porém, primeiramente será realizado um teste de verificação com objetivo de avaliar se o protótipo está realmente medindo as grandezas com a melhor precisão possível.

Para isso, será utilizada uma fonte de bancada para gerar tensões e correntes de referência. Apesar da indicação de tensão e corrente da fonte de bancada, será utilizado um multímetro *true RMS* com alta resolução para comparação com os resultados obtidos com o protótipo.

A metodologia dos ensaios consiste em realizar os testes como eram feitos anteriormente ao trabalho e testar utilizando o protótipo para então comparar os resultados obtidos. Para isso, serão utilizadas as mesmas amostras em ambos os métodos. A preparação e o teste serão cronometrados para comparação entre os métodos.

5.1. Verificação do protótipo

O processo de verificação é realizado para determinar o real desempenho de medição do protótipo. O DR60 passa por um processo de calibração ao final do seu processo produtivo. Este processo de calibração é realizado com o objetivo de compensar os desvios dos componentes utilizados nas placas de aquisição analógicas.

Apesar do DR60 estar calibrado de acordo com o processo interno, esta verificação é realizada como forma de verificar a influência das modificações realizadas no equipamento. Por conta disso, as medições devem ser realizadas utilizando as conexões expostas na seção 4.3. Isso possibilita que eventuais problemas de conexão possam ser detectados.

A verificação é realizada utilizando medições do multímetro Keysight 3458A para obtenção do valor verdadeiro convencional (VVC). Características de medição do multímetro 2458A são apresentadas na próxima seção 5.1.1. Os ensaios são apresentados nas seções subsequentes.

5.1.1. Multímetro Keysight 3458A

O multímetro digital modelo 3458A da Keysight (Figura 16) apresenta ótima performance de medição. Seu uso é indicado para aplicações que necessitam de taxas de aquisição elevadas, alta resolução e precisão (KEYSIGHT, 2014).



Figura 16. Multímetro Keysight modelo 3458A. Fonte: (KEYSIGHT, 2014)

A precisão deste multímetro varia principalmente de acordo com o tipo de sinal, configuração do modo de medição e tempo de uso. Essas informações foram utilizadas, em conjunto a folha de dados disponibilizada pelo fabricante, para o levantamento da precisão das medições de tensão e corrente utilizadas na verificação. O resultado é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Precisão multímetro 3458A de acordo com medições. Fonte (KEYSIGHT, 2014)

Medição	Precisão		
	Tensão CC (mV)	Corrente CC (μ A)	Percentual
0,100 A	-	4,5	\pm 0,0045 %
0,500 A	-	67,5	\pm 0,0135 %
1 A	-	125	\pm 0,0125 %
12 V	0,396	-	\pm 0,0033 %
125 V	1,85	-	\pm 0,0015 %

Com base nos resultados da análise apresentados na Tabela 10, percebe-se que a precisão do multímetro é pelo menos 7 vezes melhor que a precisão fornecida pela folha de dados do DR60. Idealmente a precisão do equipamento utilizado como referência deve ser de pelo menos 10 vezes melhor, porém a precisão do DR60 indicada na folha de dados não representa a precisão do equipamento, e sim o limite mínimo necessário para determinada classe de precisão. Dessa forma, e por falta de melhor opção, considera-se que o multímetro pode ser utilizado como referência de medição para a verificação do protótipo.

5.1.2. Tensão

Para a verificação de tensão foram escolhidas duas tensões que representam bem as grandezas do circuito de entrada e de saída. Os pontos de medição de tensão são 12 V cc e 125 V cc. A tensão de 12 V cc é obtida através de uma fonte regulável de bancada enquanto a tensão de 125 V cc é obtida com uma fonte de painel. Apesar de ambas as fontes possuírem saídas reguladas, será sempre considerada a medição obtida pelo multímetro de precisão Keysight, modelo 3458A.

O teste foi realizado aplicando a tensão de 125 V cc na conexão da tensão de entrada do protótipo e a tensão de 12 V cc na conexão de saída. Dessa forma foi possível obter ambas as medições de uma só vez através do uso do *script*.

Além da medição realizada pelo protótipo, também foi feita a medição manual utilizando o multímetro de alta precisão. A seguir é ilustrado o *setup* do teste.

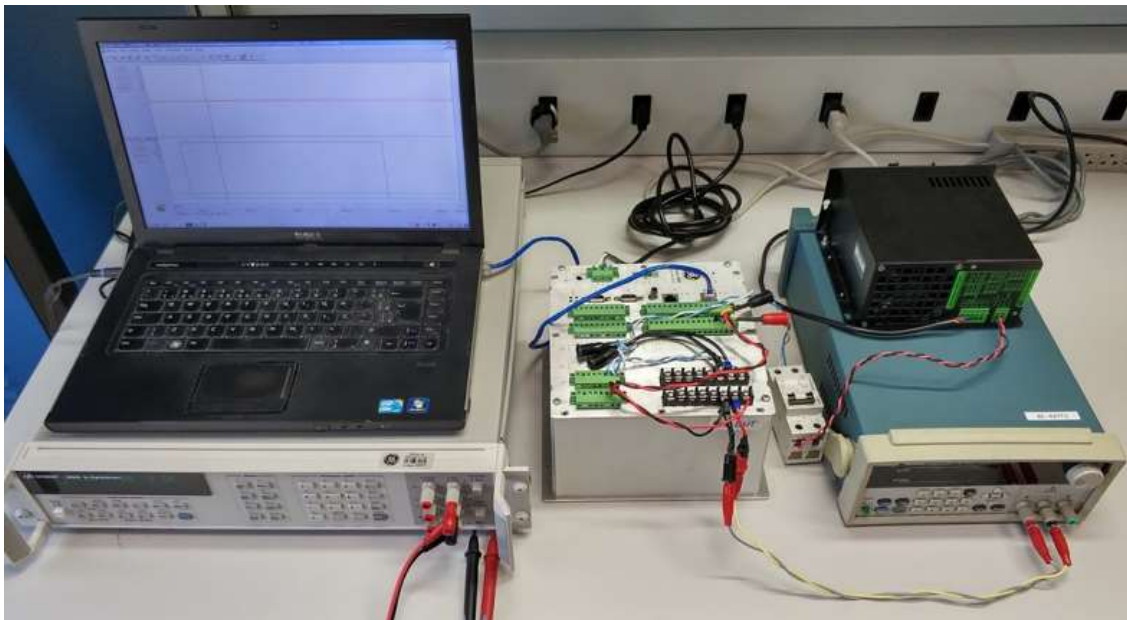


Figura 17. *Setup* do teste de verificação do protótipo. Fonte: Próprio autor

O teste é repetido 5 vezes para melhor caracterização do desempenho de medição do protótipo. Um dos resultados do teste é apresentado a seguir através da visualização do arquivo *COMTRADE*.

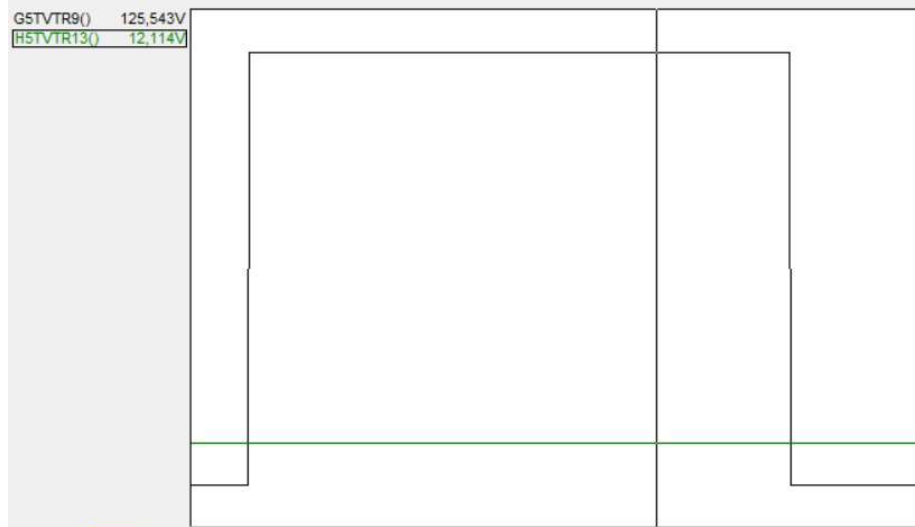


Figura 18. Resultado da verificação de tensão. Fonte: Próprio autor

A comparação do resultado com os valores de referência é apresentada na Tabela 11, conforme pode ser visto na sequência.

Tabela 5. Medições de tensão do protótipo. Fonte: Próprio autor

Referência (V cc)	Medição (V cc)
12,0009	12,114
12,0009	12,108
12,0009	12,101
12,0009	12,103
12,0009	12,107
125,397	125,54
125,397	125,54
125,397	125,53
125,397	125,54
125,397	125,51

Os resultados apresentados na Tabela 11 permitem a caracterização da precisão do protótipo com certo grau de confiança. O valor verdadeiro convencional (VVC) da tensão de 12 V é 12,0009 V, enquanto que para a tensão de 125 V tem-se 125,397 V. A tendência de medição (Td) do protótipo é obtida através da equação

$$Td = \bar{I} - VVC \quad (5)$$

onde:

\bar{I} média aritmética das indicações;
 Td tendência da medição;
VVC valor verdadeiro convencional.

Substituindo os valores obtêm-se a tendência de medição para 12 e 125 V:

$$Td_{12V} = 0,106 V$$

$$Td_{125V} = 0,132 V$$

Observa-se que o protótipo apresenta uma tendência positiva para ambas as medições de tensão verificadas. Essa tendência pode ser corrigida através da equação

$$C = -Td \quad (6)$$

onde C representa o valor de correção que deve ser somado às medições do protótipo como forma de atenuar essa parcela de erro. Logo, os valores de correção são:

$$C_{12V} = -0,106 V$$

$$C_{125V} = -0,132 V$$

Uma vez determinadas as correções, pode-se expressar as indicações corrigidas e explorar a variação de cada indicação em relação à parcela aleatória do erro de medição. O erro aleatório é obtido através da equação

$$Ea_i = I_i - \bar{I} \quad (7)$$

onde:

Ea_i Erro aleatório da i-ésima indicação;

I_i i-ésima indicação;

\bar{I} média das indicações.

As indicações corrigidas são apresentadas, juntamente com seus respectivos erros aleatórios, na Tabela 12.

Tabela 11. Estimativa de erro aleatório das medições de tensão. Fonte: Próprio autor

Referência (V)	Indicações (V)	Correção (V)	Indicação Corrigida (V)	Erro aleatório (V)
12,0009	12,114	-0,11	12,004	0,007
	12,108		11,998	0,001
	12,101		11,991	-0,006
	12,103		11,993	-0,004
	12,107		11,997	0,000
125,397	125,540	-0,13	125,410	0,005
	125,541		125,411	0,006
	125,537		125,407	0,002
	125,543		125,413	0,008
	125,512		125,382	-0,023

Analisando a coluna “Erro Aleatório” da Tabela 12, pode-se ter uma ideia da faixa de valores em que o erro aleatório é esperado. Entretanto, para se ter uma compreensão mais aprofundada do erro aleatório presente nas medições realizadas com o protótipo, serão utilizados conceitos estatísticos para determinar a repetitividade estimada de cada tipo de medição.

Para determinar a repetitividade será considerado que a distribuição do erro aleatório pode ser representada por uma distribuição gaussiana, com incerteza-padrão determinada através da equação

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (8)$$

onde:

u incerteza-padrão a partir da amostra

I_i i-ésima indicação

\bar{I} média das indicações

n número de medições repetitivas efetuadas

A incerteza-padrão é apresentada abaixo, de acordo com o nível de tensão.

$$u_{12V} = 0,00503 V$$

$$u_{125V} = 0,0129 V$$

Com base na incerteza-padrão pode-se estimar a repetitividade utilizando o fator *t de Student* conforme equação

$$Re = \pm t \cdot u \quad (9)$$

onde:

Re Repetitividade;

t Coeficiente *t de student* para 95,45% de confiabilidade e n-1 graus de liberdade;

u Incerteza-padrão obtida a partir da amostra com n-1 graus de liberdade.

O coeficiente *t de student* é obtido para 4 graus de liberdade e confiabilidade de 95,45%. A tabela contendo os coeficientes para diversos graus de liberdade e confiabilidade é apresentada no Anexo I. Dessa forma, obtém-se:

$$Re_{12V} = \pm 0,014 V$$

$$Re_{125V} = \pm 0,037 V$$

5.1.3. Corrente

A verificação da medição de corrente segue a mesma metodologia da tensão. A diferença é que para este teste foi necessário conectar a fonte de corrente diretamente nos terminais do canal de corrente (passando pelo multímetro de precisão, que está conectado em série).

As aferições de corrente foram realizadas em três níveis diferentes limitados a 1 ampère – limite dado pela capacidade de medição de corrente do multímetro de precisão. Os níveis são 100 mA, 500 mA e 1 A. Assim como no caso da tensão, também foram realizadas 5 medições em cada nível para o levantamento da precisão de medição do protótipo. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 12. Erro de medição de corrente contínua do protótipo. Fonte: Próprio autor

Referência (A)	Medição (A)
0,1000	0,107
0,1000	0,107
0,1000	0,108
0,1000	0,108
0,1000	0,108
0,5000	0,508
0,5000	0,507
0,5000	0,507
0,5000	0,507
0,5000	0,507
1,0000	1,007
1,0000	1,007
1,0000	1,008
1,0000	1,008
1,0000	1,007

A Equação 5 é utilizada para o cálculo da tendência de medição de corrente do protótipo. Os resultados são apresentados abaixo, de acordo com cada nível.

$$Td_{0,1A} = 0,008 A$$

$$Td_{0,5A} = 0,007 A$$

$$Td_{1A} = 0,007 A$$

De forma similar ao aplicado às medições de tensão, utiliza-se a Equação 6 para determinar as correções:

$$C_{0,1A} = -0,008 A$$

$$C_{0,5A} = -0,007 A$$

$$C_{1A} = -0,007 A$$

Uma vez definidas as correções do erro sistemático, pode-se aplicar a equação 7 para determinar o erro aleatório estimado das medições de corrente. A Tabela 14 apresenta as indicações corrigidas e o erro aleatório de cada indicação.

Tabela 13. Estimativa erro aleatório medições de corrente. Fonte: Próprio autor

Referência (A)	Indicações (A)	Correção (A)	Indicação Corrigida (A)	Erro aleatório (A)
0,100	0,107	-0,008	0,099	-0,0006
	0,107		0,099	-0,0006
	0,108		0,100	0,0004
	0,108		0,100	0,0004
	0,108		0,100	0,0004
0,500	0,508	-0,007	0,501	0,0008
	0,507		0,500	-0,0002
	0,507		0,500	-0,0002
	0,507		0,500	-0,0002
	0,507		0,500	-0,0002
1,000	1,007	-0,007	1,000	-0,0004
	1,007		1,000	-0,0004
	1,008		1,001	0,0006
	1,008		1,001	0,0006
	1,007		1,000	-0,0004

De maneira similar à apresentada na seção 5.1.2, define-se a incerteza-padrão para cada nível de corrente utilizando a equação 8:

$$u_{0,1A} = 0,000548 A$$

$$u_{0,5A} = 0,000447 A$$

$$u_{1A} = 0,000548 A$$

Com base na incerteza-padrão pode-se estimar a repetitividade utilizando o fator *t de Student* conforme equação 9. O coeficiente *t de student* é obtido para 4 graus de liberdade e confiabilidade de 95,45%, igual ao utilizado na tensão. A repetitividade para cada nível de corrente fica:

$$Re_{0,1A} = \pm 0,002 A$$

$$Re_{0,5A} = \pm 0,001 A$$

$$Re_{1A} = \pm 0,002 A$$

5.1.4. Análise

O protótipo foi verificado nos principais pontos de medição de tensão e corrente. Os resultados das seções 5.1.2 e 5.1.3 indicam que o protótipo apresenta um tendência de medição

positiva e dependente do nível do sinal medido. A tendência é uma estimativa do erro sistemático.

O erro sistemático é previsível e foi atenuado através de correções aplicadas às medições. Para as medições de tensão da saída da fonte, a correção será de $-0,11\text{ V}$ enquanto que para a entrada será feita a correção com o valor de $-0,13\text{ V}$.

As medições de corrente recebem correção de $-0,007\text{ A}$ para toda a faixa de medição. Todas essas correções são implementadas de forma automática na planilha de cálculo. Com as correções aplicadas às medições espera-se que, em média, o protótipo passe a realizar indicações corretas.

Embora a média de medições se aproxime do VVC, as indicações ainda apresentam erro aleatório. O erro aleatório foi estimado para 95,45% de probabilidade. A repetitividade da medição de tensão na entrada da fonte foi de $\pm 0,037\text{ V}$, relativamente grande se comparada à entrada que foi de $\pm 0,014\text{ V}$. Já no caso da corrente, observa-se que a repetitividade é praticamente constante nos três níveis testados. Dessa forma será adotado o valor de $\pm 0,002\text{ A}$.

Com as características de medição do protótipo levantadas, pode-se avaliar o desempenho de medição do protótipo como suficiente para a análise proposta neste trabalho.

5.2. Estudo de caso 1: fonte CA-CC 60 W

A fonte DWPS60W (Figura 19) foi escolhida para compor este estudo de caso pois se trata de uma fonte desenvolvida recentemente e que representa bem as características da maioria das fontes utilizadas nos equipamentos da linha de produtos Reason.



Figura 19. Fonte DWPS60_v01. Fonte: Imagem cortesia GE

Trata-se de um módulo composto por uma placa de circuito impresso (PCI) com duas fontes independentes exatamente iguais que compartilham única saída. O uso de duas fontes é comum em sistemas onde se exige redundância como forma de aumentar a confiabilidade do sistema.

Todo este estudo de caso será baseado no teste de somente uma das duas fontes, dado que ambas possuem o mesmo projeto. Diferentes abordagens de teste são possíveis neste cenário, porém foi decidido realizar o teste de forma a validar o projeto do conversor sem adicionar mais variáveis. As características de projeto da fonte são apresentadas a seguir:

Tensão de entrada: 85 a 264 V ca / 100 a 300 V cc;

Frequência: 50/60 Hz;

Tensão de saída: 12 V cc;

Corrente máxima de saída: 5 A;

Potência máxima de saída: 60 W;

Eficiência: ~80%;

Isolação: 5 kV cc;

Tempo de sustentação: >10 ms;

Corrente de partida: <60 A pico;

Regulação de carga: <2%;

Temperatura de operação: -40 a 55 °C.

Conforme detalhado na metodologia de teste, serão feitos todos os testes da maneira atual (manual) e os resultados serão comparados aos obtidos com o teste realizado pelo protótipo. Os resultados são apresentados nesta ordem.

5.2.1. Testes - modo manual

O procedimento de testes é realizado conforme descrito na seção 2.3. A Figura 20 mostra a bancada de testes da fonte DWPS60 com todos os itens e equipamentos identificados. Como se trata de uma fonte de tensão com entrada alternada e sem correção de fator de potência, faz-se necessário o uso de um equipamento capaz de medir corrente de forma *true* RMS. Este cuidado de utilizar multímetros *true* RMS sempre que for medir cargas não-lineares é fundamental para que a medição seja condizente com a realidade.



Figura 20. Bancada de testes para procedimento manual. Fonte sob teste DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

A seguir são descritos os itens numerados da Figura 20:

1. Osciloscópio. Fabricante Agilent, modelo MSO9104A;
2. Fonte 125 V cc. Fabricante MCE, modelo CHMF 125-3;
3. Rede 220 V ca;
4. Estabilizador 115 V ca. Fabricante TS SHARA, modelo EVS Line 1000;
5. Reostato 500 W. Fabricante ELETELE, modelo N12S;
6. Disjuntor bipolar 10 A;
7. Multímetro de bancada. Fabricante Keysight, modelo 3458A;
8. Resistor shunt 15 m Ω ;
9. Fonte DWPS60_v01;
10. Multímetro portátil. Fabricante Minipa, modelo ET-2650B;
11. Multímetro portátil. Fabricante Minipa, modelo ET-2042D;
12. Folha de anotação.

Neste teste foi necessário utilizar um resistor *shunt* para a medição da corrente de entrada da fonte. O único multímetro *true RMS* (item 7) possui capacidade de medição de

corrente limitada a 1,5 A de pico – valor inferior ao exigido pela fonte em alguns testes. Dessa forma o multímetro foi utilizado na função de medição de tensão e seus terminais conectados nos terminais do shunt (item 8).

O multímetro (item 10) está conectado entre a saída da fonte e carga no modo de medição de corrente contínua. O terceiro multímetro (item 11) é usado de modo livre para medição sequencial da tensão da entrada e saída.

O ajuste do reostato é outro detalhe importante que deve ser feito com atenção para garantir bons resultados. Para determinar o valor de resistência que deve ser utilizado para os valores de 50% e 100%, utiliza-se a equação:

$$R_{carga} = \frac{V_{saida}^2}{P_{saida}} \quad (10)$$

Aplicando a equação para a fonte DWPS60 temos os seguintes resultados:

$$R_{30W} = 4,8 \Omega$$

$$R_{60W} = 2,4 \Omega$$

Para ajustar o reostato com os valores acima calculados, sugere-se o uso de um multímetro de precisão ou uma ponte RLC. Neste trabalho sempre que a resistência de carga for ajustada é utilizada a ponte RLC do fabricante Keysight modelo U1733C. Antes do uso é feita a calibração através da tecla de calibração, o que garante a melhor medição possível.

Os resultados das medições são apresentados na Tabela 15.

Tabela 14. Resultados da aquisição de dados manual da fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Fonte CA modelo DWPS60_v01							
Carga Nominal	Carga Real (Ω)	Tensão Nominal	Tensão Entrada	Tensão shunt Entrada (mV)	Tensão Saída (V cc)	Corrente Saída (A)	Ruído Saída (mV)
0%	-	110 V ca	117,0 V ca	0,43	12,00	-	69
50%	4,71	110 V ca	116,9 V ca	8,28	11,97	2,51	225
100%	2,42	110 V ca	116,5 V ca	16,13	11,93	4,86	250
0%	-	220 V ca	212,0 V ca	0,61	12,00	-	79
50%	4,71	220 V ca	213,0 V ca	4,78	11,97	2,51	182
100%	2,42	220 V ca	213,0 V ca	8,96	11,93	4,84	220
0%	-	125 V cc	125,1 V cc	0,115	12,00	-	98
50%	4,71	125 V cc	125,1 V cc	4,61	11,97	2,45	230
100%	2,42	125 V cc	125,1 V cc	8,95	11,93	4,86	265

Os dados da tabela 15 possuem uma medição indireta – quinta coluna – que é a medição da tensão sobre o shunt da entrada. Essa tensão é proporcional à corrente da entrada e a relação é dado pela Lei de Ohm escrita para o cálculo da corrente:

$$I_{entrada} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (11)$$

Dessa forma os resultados com os valores calculados de corrente são apresentados a seguir.

Tabela 15. Resultados da aquisição apresentando os valores da corrente de entrada. Fonte: Próprio autor

Fonte CA modelo DWPS60_v01							
Carga Nominal	Carga Real	Tensão Nominal	Tensão Entrada	Corrente Entrada (A)	Tensão Saída (V cc)	Corrente Saída (A)	Ruído Saída (mV)
0%	-	110 V ca	117,0 V ca	0,029	12,00	-	69
50%	4,71 Ω	110 V ca	116,9 V ca	0,552	11,97	2,51	225
100%	2,42 Ω	110 V ca	116,5 V ca	1,075	11,93	4,86	250
0%	-	220 V ca	212,0 V ca	0,041	12,00	-	79
50%	4,71 Ω	220 V ca	213,0 V ca	0,319	11,97	2,51	182
100%	2,42 Ω	220 V ca	213,0 V ca	0,597	11,93	4,84	220
0%	-	125 V cc	125,1 V cc	0,008	12,00	-	98
50%	4,71 Ω	125 V cc	125,1 V cc	0,307	11,97	2,45	230
100%	2,42 Ω	125 V cc	125,1 V cc	0,597	11,93	4,86	265

Com os dados obtidos na tabela 16, é possível realizar a maioria dos testes comentados nos capítulos 1 e 2. A seguir serão apresentados os resultados de cada teste.

1. Potência aparente

Conforme apresentado na seção 2.2.1, a potência aparente é obtida através da multiplicação da tensão de entrada (*RMS*) pela corrente de entrada (*RMS*). O cálculo é realizado somente para os testes com tensão alternada e é apresentado na Tabela 17.

Tabela 16. Potência aparente, teste manual DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V)	Corrente Entrada (A)	Potência Aparente (VA)
116,90	0,552	64,5288
116,5	1,075	125,2763
213	0,319	67,876
213	0,597	127,232

2. Eficiência

A eficiência é calculada conforme descrito na seção 2.2.4. Conforme descrito em seções anteriores, o fator de potência não pode ser determinado devido à falta de equipamento, somente é possível determinar a eficiência quando a fonte é alimentada com corrente contínua. Os resultados são, então, apresentados para os dois diferentes níveis de carga na Tabela 18.

Tabela 17. Eficiência, teste manual DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V cc)	Corrente Entrada (A)	Tensão Saída (V cc)	Corrente Saída (A)	Potência Entrada (W)	Potência Saída (W)	Eficiência (%)
125,1	0,307	11,97	2,45	38,41	29,33	76,4
125,1	0,597	11,93	4,86	74,68	57,98	77,6

3. Consumo Máximo

O consumo máximo é a medição da corrente na condição em que a menor tensão é aplicada na entrada da fonte que opera com carga máxima, conforme descrito na seção 2.2.5. Porém as vezes não fica claro qual tensão é a menor, como no caso entre 110 V ca e 125 V cc. Desta forma, o mais usual é simplesmente conferir todos os valores de corrente obtidos pela tabela 16 e o maior valor será o consumo máximo. O resultado é apresentado na tabela 19.

Tabela 18. Consumo máximo, teste manual DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V ca)	Corrente Saída (A)	Consumo Máximo (A)
116,5	4,86	1,075

4. Consumo em *stand-by*

O consumo em *stand-by* (seção 2.2.7) é obtido de maneira similar ao consumo máximo, porém sem carga. Na tabela 20, são apresentadas as medições para os três níveis de tensão testados.

Tabela 19. Consumo em *stand-by*, teste manual DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada	Consumo <i>stand-by</i>
117 V ca	3,4 VA
212 V ca	8,7 VA
125,1 V cc	1 W

5. Regulação de carga

Conforme visto na seção 2.2.11, a regulação de carga é dada pela equação (1). Através da aplicação da equação com os dados obtidos pela Tabela 16, têm-se os resultados de regulação de carga para os três diferentes níveis de tensão conforme a tabela 21.

Tabela 20. Regulação de carga, teste manual DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Tensão Nominal	Regulação Carga (%)
110 V ca	0,59
220 V ca	0,59
125 V cc	0,59

6. Regulação de linha

A regulação de linha (seção 2.2.12) é dada pela equação (2). Através da aplicação da equação com os dados da tabela 16, têm-se o resultado para os três níveis de carga descritos na tabela 22.

Tabela 21. Regulação de linha, teste manual DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Corrente Saída	Regulação Linha
0%	0,00%
50%	0,00%
100%	0,00%

7. Ruído da tensão de saída

O ruído da tensão de saída da fonte DWPS60 foi medido conforme descrito na seção 2.2.13. Os resultados podem ser obtidos diretamente da Tabela 16, última coluna. Por conveniência, os resultados são replicados na Tabela 23.

Tabela 22. Ruído da tensão de saída, teste manual da fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada	Corrente Saída (A)	Ruído Saída (mV)
117,0 V ca	-	69
116,9 V ca	2,51	225
116,5 V ca	4,86	250
212,0 V ca	-	79
213,0 V ca	2,51	182
213,0 V ca	4,84	220
125,1 V cc	-	98
125,1 V cc	2,45	230
125,1 V cc	4,86	265

Os resultados dos testes até este estágio foram obtidos com base nos dados da Tabela 16. Agora serão apresentados os resultados dos testes que exigem diferentes conexões e configurações dos equipamentos de teste.

8. Corrente de partida

Para a medição da corrente de partida foi utilizado um resistor *shunt* de 15 mΩ, conforme método descrito na seção 2.2.6. A medição da corrente de partida foi realizada para os três níveis de tensão de entrada (110 V ca, 220 V ca e 125 V cc).

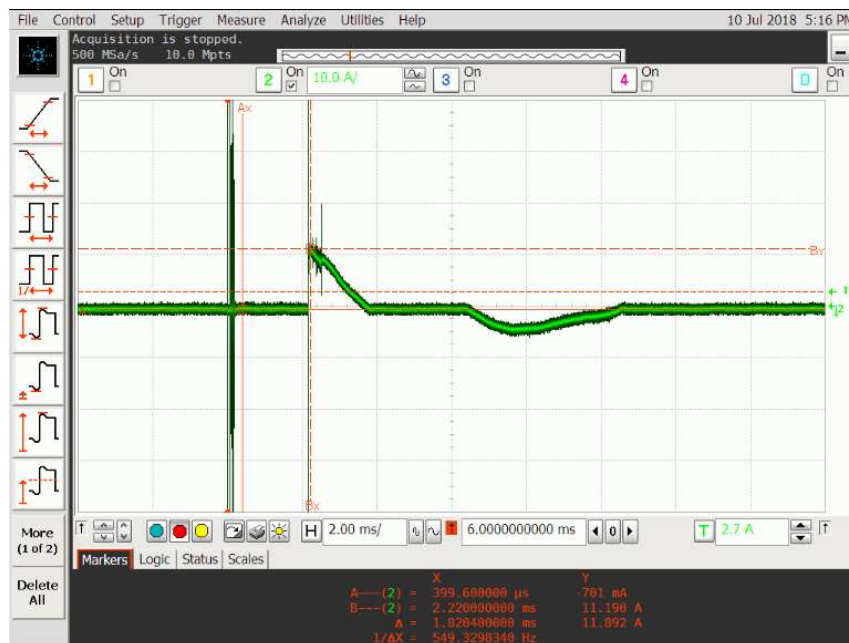


Figura 21. Corrente de partida em 110 V ca, fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

A Figura 21 apresenta a forma de onda da corrente de partida com alimentação de 110 V ca. Para mostrar a forma de onda da corrente diretamente no osciloscópio, foi configurado o ganho da relação de tensão e corrente – dada pela Lei de Ohm – diretamente na configuração da ponteira do osciloscópio. Para melhorar a visualização, também foi configurado para que a unidade de grandeza fosse o Ampère. Os resultados da corrente de partida nas três situações de teste são apresentados na Tabela 24:

Tabela 23. Resultados do teste manual da corrente de partida, fonte DWPS60. Fonte: Próprio autor

Tensão da entrada	Corrente de partida (A)
110 V ca	11,19
220 V ca	27,16
125 V cc	11,03

9. Tempo de sustentação

A medição do tempo de sustentação (*hold-up time*) foi realizada de acordo com o exposto na seção 2.2.8. Como o osciloscópio utilizado não possui canais isolados, foi necessário utilizar um artifício para deixar ambas entrada e saída na mesma referência. Isto é feito ligando um dos cabos da entrada ao *gnd* (0 V) da saída do conversor. A modificação é ilustrada na Figura 22.

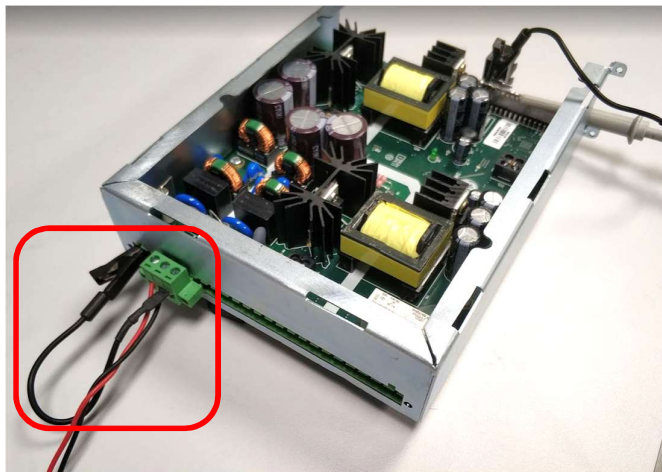


Figura 22. Conexão adicional para uso de osciloscópio não isolado. Fonte: Próprio autor

Este teste é realizado para todas as variações de tensão de entrada nas condições de meia carga e carga nominal. O resultado da medição para a condição de 110 V ca e 50% de carga é ilustrado na Figura 23. Optou-se por não apresentar as formas de onda das demais condições de teste, pois possuem bastante similaridade.

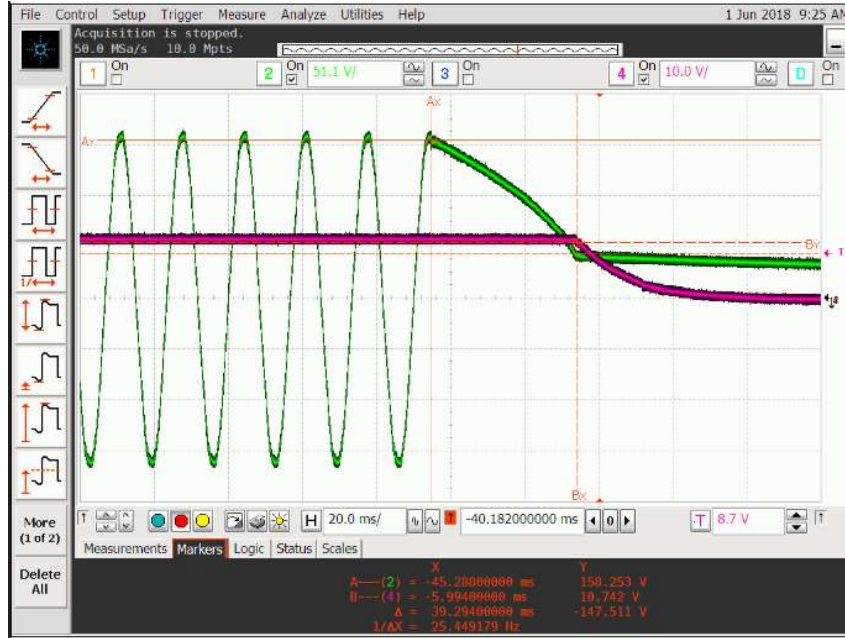


Figura 23. Tempo de sustentação para 110 V ca e 50% de carga, teste manual fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

A leitura do tempo de sustentação é feita na parte inferior da Figura 23, onde encontram-se os dados de posicionamento dos cursores A e B. O tempo de sustentação é o valor do Delta (Δ) no eixo x. O mesmo procedimento é adotado para os demais testes.

Os resultados de todas as condições testadas são apresentados na Tabela 25.

Tabela 24. Resultados do teste manual do tempo de sustentação, fonte DWPS60. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada	Carga na saída (%)	Tempo de sustentação (ms)
110 V ca	50	39,3
110 V ca	100	19,4
220 V ca	50	142,9
220 V ca	100	70,6
125 V cc	50	22,6
125 V cc	100	11,1

10. Resposta dinâmica à variação de carga

O teste foi realizado conforme apresentado na seção 2.2.10. A variação de carga foi feita partindo sempre da condição sem carga para as condições de 50% ou 100% de carga. A Figura 24 contém as formas de onda da entrada e da saída durante a aplicação da carga máxima da fonte DWPS60 quando alimentada em 220 V ca.

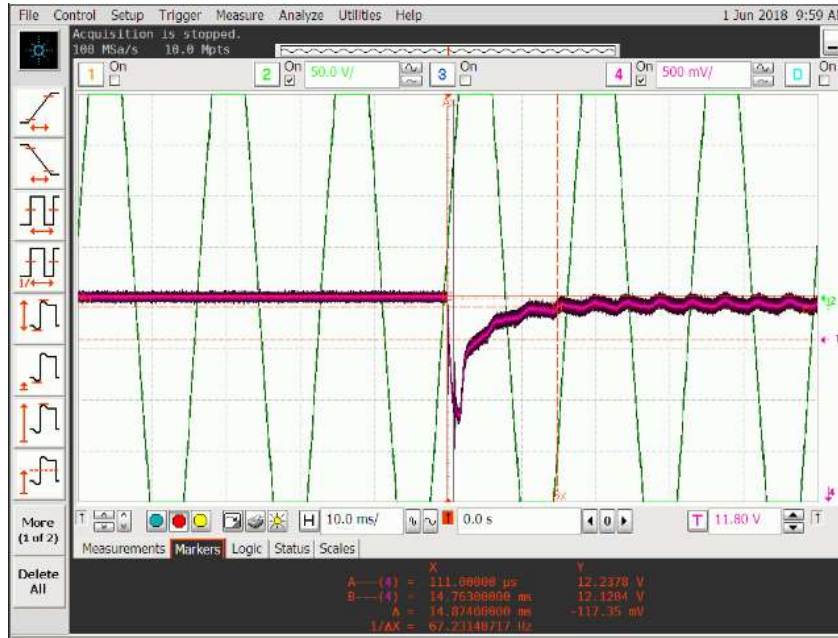


Figura 24. Resposta dinâmica para 220 V ca e 100% de carga, teste manual fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

O resultado da medição presente na Figura 24, assim como todas as demais combinações de tensão de entrada e carga, foram sintetizados na Tabela 26.

Tabela 25. Resposta dinâmica obtida através do teste manual, fonte DWPS60. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada	Carga na saída (%)	Resposta dinâmica (ms)
110 V ca	50	12,54
110 V ca	100	15,65
220 V ca	50	11,71
220 V ca	100	14,87
125 V cc	50	15,85
125 V cc	100	19,20

11. Tempo de inicialização

O tempo de inicialização da fonte DWPS60_v01 é medido conforme visto na seção 2.2.9 para os diferentes níveis de tensão da entrada. A captura do tempo de inicialização na condição de teste de 110 V ca é apresentada na Figura 25.

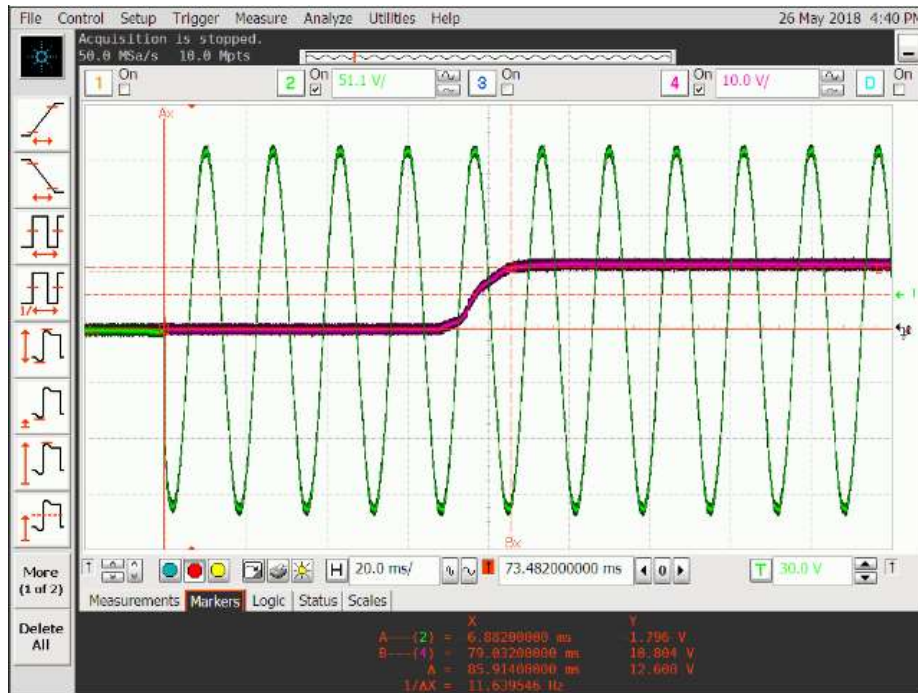


Figura 25. Tempo de inicialização para 110 V ca, teste manual fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

O resultado obtido através da Figura 25 é apresentado na Tabela 27 juntamente com os tempos de inicialização das demais condições de teste.

Tabela 26. Resultado das medições do tempo de inicialização, fonte DWPS60 - teste manual. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada	Tempo de inicialização (ms)
110 V ca	85,9
220 V ca	26,2
125 V cc	84,1

O tempo total de testes da fonte DWPS60_v01, seguindo a metodologia atual de testes foi de aproximadamente 8 horas considerando todos os ajustes entres os testes e os testes em si. Este tempo não leva em consideração a obtenção dos resultados e a criação de relatório. Para estas atividades, pode-se considerar mais 8 horas. Dessa forma, o tempo total para realizar todos os testes manuais é de aproximadamente 2 dias de trabalho (16 horas).

5.2.2. Testes – protótipo DR60 modificado

A fonte DWPS60_v01 foi testada também utilizando o protótipo desenvolvido neste trabalho. Desta forma, é possível confrontar os resultados do teste manual e verificar se há vantagens no uso do protótipo em termos de tempo de teste e qualidade de medição.

Os testes foram realizados de acordo com o procedimento apresentado na seção 4.4. O *setup* do teste é ilustrado na Figura 26 com as indicações de equipamentos utilizados.

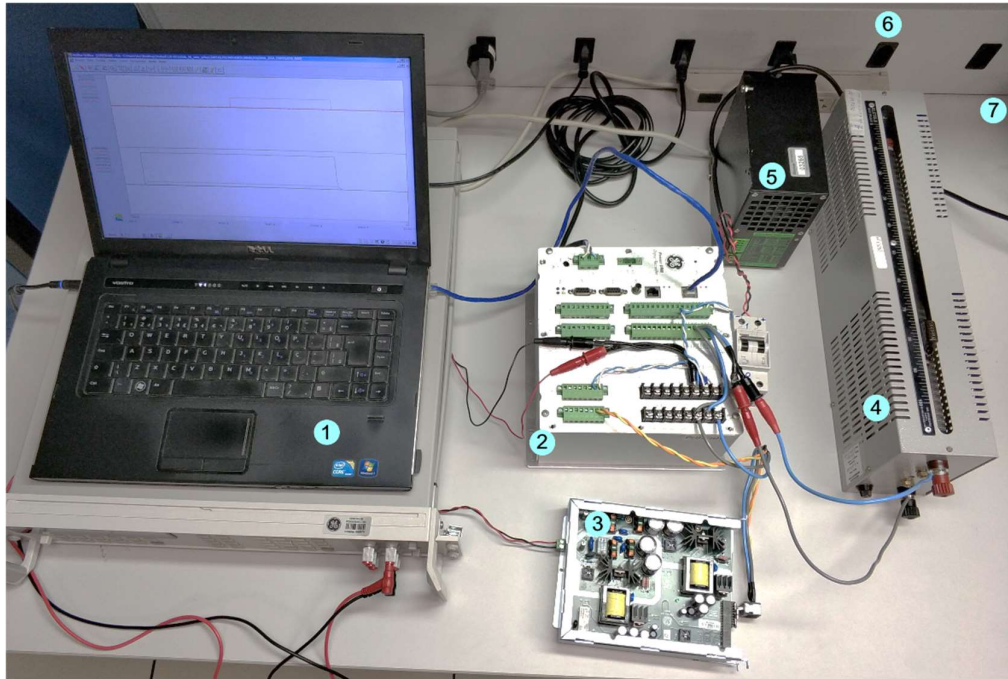


Figura 26. *Setup* do teste com protótipo, fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Legenda dos itens da Figura 26.

1. Computador;
2. Protótipo DR60;
3. Fonte DWPS60_v01;
4. Reostato 500 W. Fabricante ELETELE, modelo N12S;
5. Fonte 125 V cc. Fabricante MCE, modelo CHMF 125-3;
6. Rede 220 V ca;
7. Estabilizador 115 V ca. Fabricante TS SHARA, modelo EVS Line 1000. Não visível na Figura

Da etapa de aquisição de dados, obtêm-se todos os arquivos *COMTRADE*, conforme discutido na seção 4.5. Entre uma aquisição e outra, podem ser modificadas a tensão da entrada ou a carga da saída. Cada aquisição gera dois arquivos *COMTRADE*, um registro de curta e outro de longa duração. Entre uma aquisição e outra devem ser realizados os ajustes da tensão

de alimentação da fonte sob teste ou da carga. Essa estratégia permite que todas as condições de teste sejam executadas.

A seguir são apresentadas as visualizações dos arquivos *COMTRADE* - no programa *Analise* - para as condições teste de 110 V ca e 125 V cc, ambas com carga nominal. Os demais resultados são semelhantes e, portanto, as suas medições serão apresentadas na Tabela 28.

110 V ca e 100% de carga – *COMTRADE* de curta duração

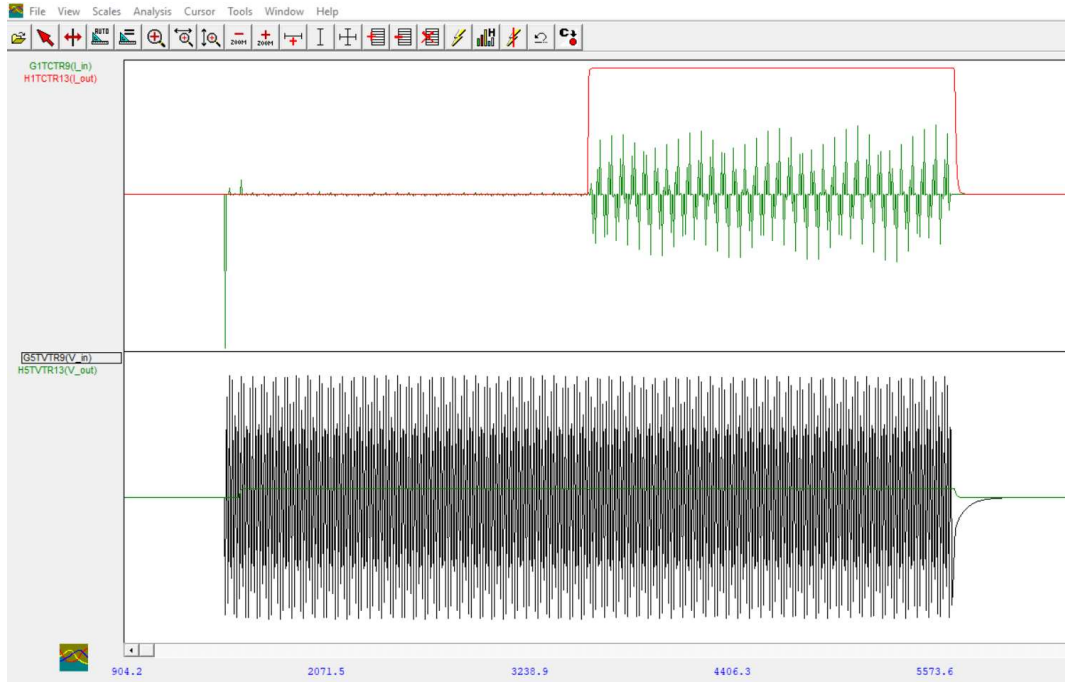


Figura 27. Visualização *COMTRADE* de curta duração. Medição em 110 V ca e 100% de carga, fonte DWPS60_v01.

Fonte: Próprio autor

110 V ca e 100% de carga – *COMTRADE* de longa duração

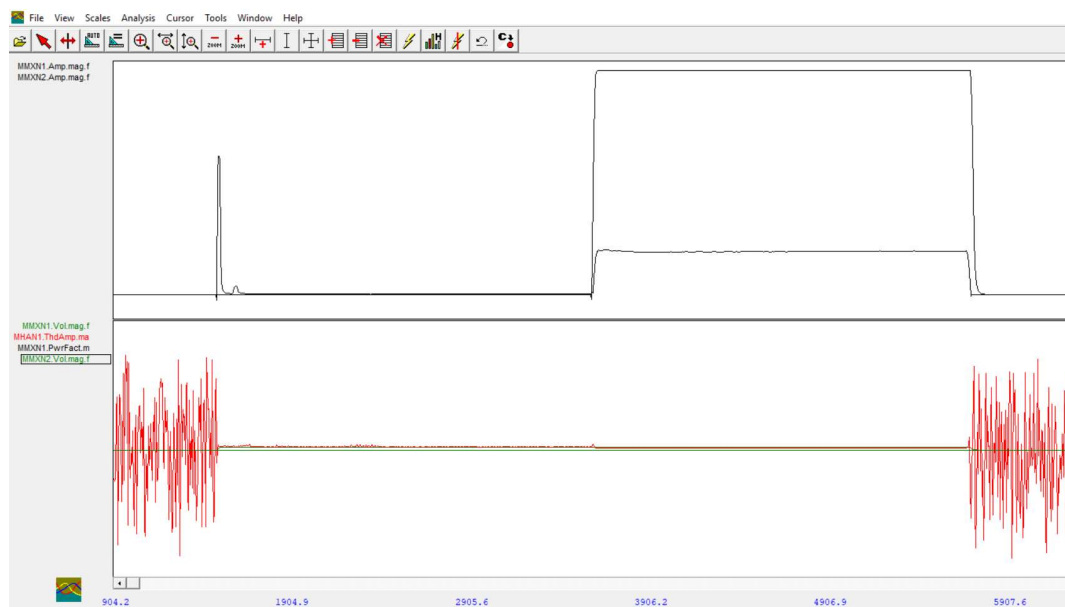


Figura 28. Visualização *COMTRADE* de longa duração. Medição em 110 V ca e 100% de carga, fonte DWPS60_v01.

Fonte: Próprio autor

No *COMTRADE* de longa duração são disponibilizadas as medições de THD e defasagem angular entre tensão e corrente. A forma de onda do THD (em vermelho na Figura 28) apresenta um ruído elevado nos períodos de tempo em que a alimentação do conversor está desligada. Tal característica é normal e esperada pois neste momento o DR60 está medindo corrente e tensão muito próxima de zero. Com magnitudes tão baixas, a distorção harmônica total fica elevada e instável.

125 V cc e 100% de carga – *COMTRADE* de curta duração

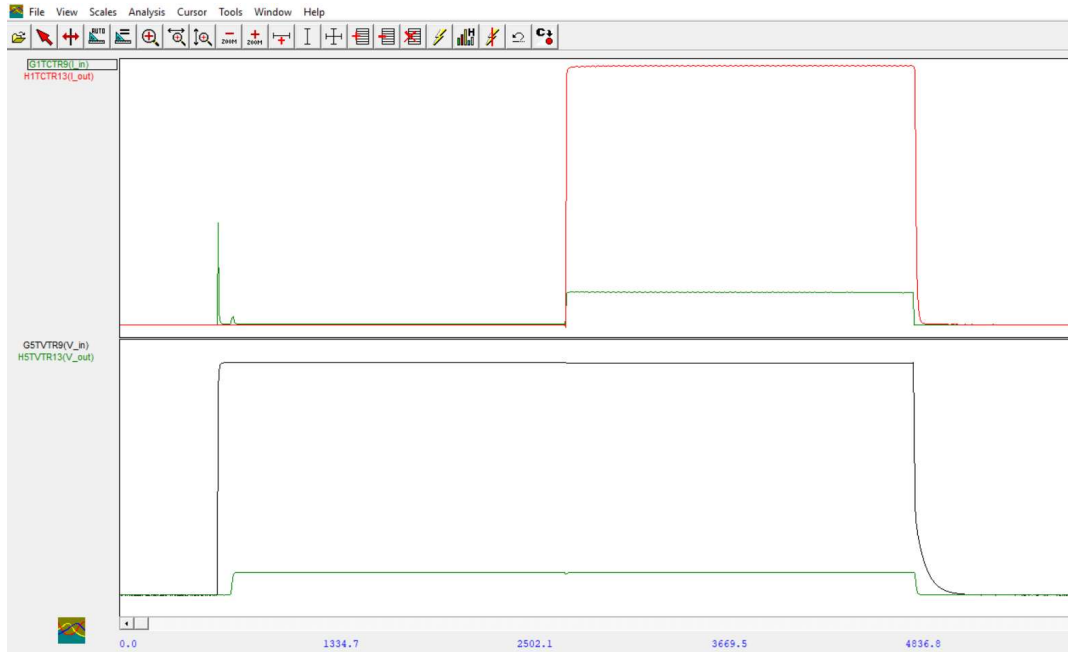


Figura 29. Visualização *COMTRADE* de curta duração. Medição em 125 V cc e 100% de carga, fonte DWPS60_v01.

Fonte: Próprio autor

125 V cc e 100% de carga – *COMTRADE* de longa duração

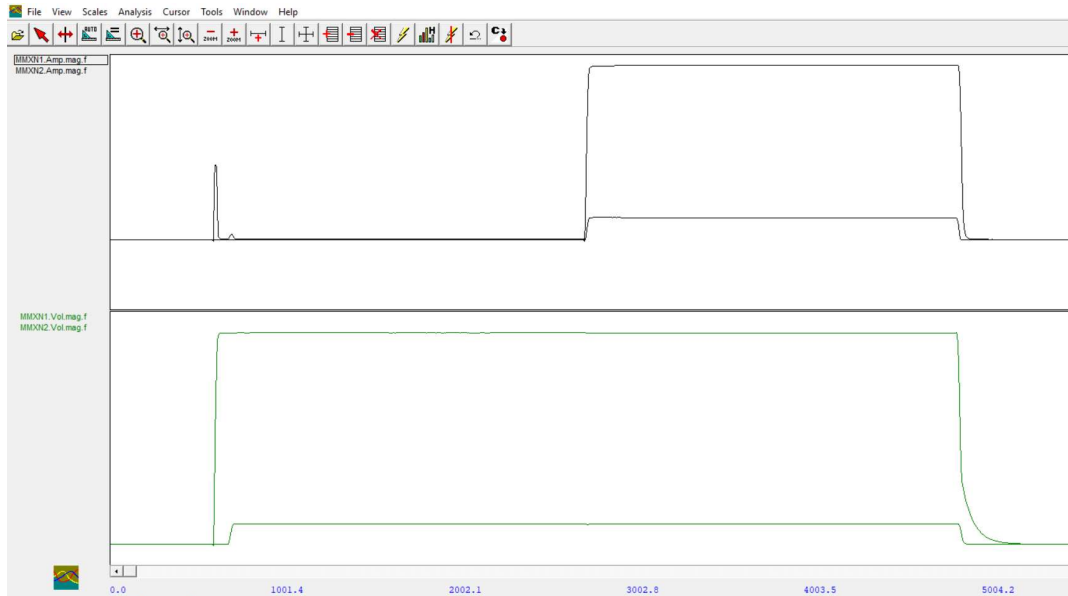


Figura 30. Visualização *COMTRADE* de longa duração. Medição em 125 V cc e 100% de carga, fonte DWPS60_v01.

Fonte: Próprio autor

Toda a análise dos arquivos *COMTRADE* foi realizada de acordo com o exposto na seção 4.6 e os resultados foram preenchidos na planilha de cálculo conforme recomendações presentes na própria planilha.

O resultado é apresentado na Tabela 28.

Tabela 27. Resultados do teste com protótipo, fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Carga Nominal	Tensão Nominal	Tensão de entrada	Corrente de entrada (A)	Tensão de saída (V cc)	Corrente de saída (A)	Deslocamento de fase	THD (%)	Tempo de sustentação (ms)	Resposta transiente de carga (ms)	Tempo de inicialização (ms)	Corrente de partida (A)	Pico da corrente de entrada (A)
0%	110 V ca	117,89 V ca	0,026	12,14	na	na	na	na	Na	na	na	na
50%	110 V ca	111,58 V ca	0,518	12,12	2,57	0,99	106,2	35,1	17,3	97,1	5,76	1,368
100%	110 V ca	117,28 V ca	0,935	12,07	4,776	0,97	100,3	18,1	20,4	na	na	2,592
0%	220 V ca	221,03 V ca	0,033	12,16	na	na	na	na	Na	na	na	na
50%	220 V ca	218,13 V ca	0,309	12,12	2,55	0,99	131	143,2	17,6	96,2	21,46	0,808
100%	220 V ca	216,61 V ca	0,526	12,09	4,774	0,99	119,4	73,7	20,7	na	na	1,365
0%	125 V cc	125,73 V cc	0,015	12,14	na	na	na	na	Na	na	na	na
50%	125 V cc	125,69 V cc	0,323	12,12	2,57	na	na	23	20,5	96,5	12,24	na
100%	125 V cc	125,44 V cc	0,578	12,07	4,78	na	na	11,9	24,1	na	na	na

Os resultados apresentados na Tabela 28 são exatamente os dados obtidos a partir dos arquivos *COMTRADE*. Conforme verificado na seção 5.1.3, é possível melhorar os resultados medidos através da aplicação das correções. Aplicando as correções, têm-se o resultado final na Tabela 29.

Tabela 28. Resultados corrigidos do teste com protótipo, fonte DWPS60_v01. Fonte: Próprio autor

Carga Nominal	Tensão Nominal	Tensão de entrada	Corrente de entrada (A)	Tensão de saída (V)	Corrente de saída (A)
0%	110 V ca	117,76 V ca	0,019	12,03	na
50%	110 V ca	111,45 V ca	0,511	12,01	2,563
100%	110 V ca	117,15 V ca	0,928	11,96	4,769
0%	220 V ca	220,90 V ca	0,026	12,05	na
50%	220 V ca	218,00 V ca	0,302	12,01	2,543
100%	220 V ca	216,48 V ca	0,519	11,98	4,767
0%	125 V cc	125,60 V cc	0,008	12,03	na
50%	125 V cc	125,56 V cc	0,316	12,01	2,563
100%	125 V cc	125,31 V cc	0,571	11,96	4,773

A apresentação completa de todos os resultados em formato de relatório é obtida automaticamente no momento em que esta tabela é preenchida na planilha de cálculo. O

relatório completo com todos os resultados da fonte DWPS60_v01 é apresentado no Apêndice B.

O tempo de testes com protótipo foi de 10 minutos. Este tempo compreende os ajustes de alimentação da fonte e da carga para aquisição dos resultados de todos os testes. Os procedimentos de leitura, análise e relatório levaram aproximadamente 1 hora e 30 minutos. Considerando também a separação dos equipamentos e montagem do *setup* de testes pode-se dizer que são necessárias aproximadamente 2 horas para realizar todos os testes inclusive com relatório.

5.3. Estudo de caso 2: fonte CC-CC 48 W

Neste estudo de caso, a fonte SFF48LDC_v02 (Figura 31) será avaliada de maneira similar à apresentada no estudo de caso 1. Esta fonte foi escolhida por se tratar de uma classe diferente de fonte quando comparada com a fonte DWPS60. Ela faz parte das fontes de corrente contínua com tensão de alimentação baixa – na ordem de até 100 V cc. Este tipo de fonte é um requisito para alguns segmentos de mercado específicos que possuem somente tensões baixas, normalmente provenientes de baterias.



Figura 31. Fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Imagem cortesia GE

De maneira similar à DWPS60, esta fonte também é totalmente redundante. Dois conversores CC-CC independentes são montados na PCI e suas saídas são controladas por um circuito de diodo ideal que determina qual fonte irá fornecer a maior parte da corrente para o equipamento. Também há uma opção que permite o compartilhamento de corrente entre as duas fontes. Assim como no estudo de caso 1, apenas um dos conversores será testado.

As características de projeto da fonte são apresentadas a seguir.

Tensão de entrada: 18 a 72 V cc;
Tensão de saída: 12 V cc;
Corrente máxima de saída: 4 A;
Potência máxima de saída: 48 W;
Eficiência: ~80%;
Isolação: 2,2 kV ca;
Tempo de sustentação: >10 ms;
Corrente de partida: <30 A pico;
Regulação de carga: <2%;
Temperatura de operação: -40 a 55 °C.

Assim como no estudo de caso 1, os testes são feitos utilizando o método manual de testes e então comparados os resultados com o teste realizado pelo protótipo. Ambos os resultados são apresentados a seguir.

5.3.1. Testes – modo manual

O procedimento de teste é muito similar ao apresentado na seção 5.2.1. A maior diferença reside no fato da fonte operar somente com corrente contínua, fato que simplifica o processo de medição através da possibilidade de uso de multímetros convencionais. Outra diferença é que as fontes CC-CC de baixa tensão de entrada normalmente são testadas para duas tensões de entrada nominais. As fontes CA-CC normalmente são testadas em 3 níveis diferentes pois também são testadas com entrada CC.

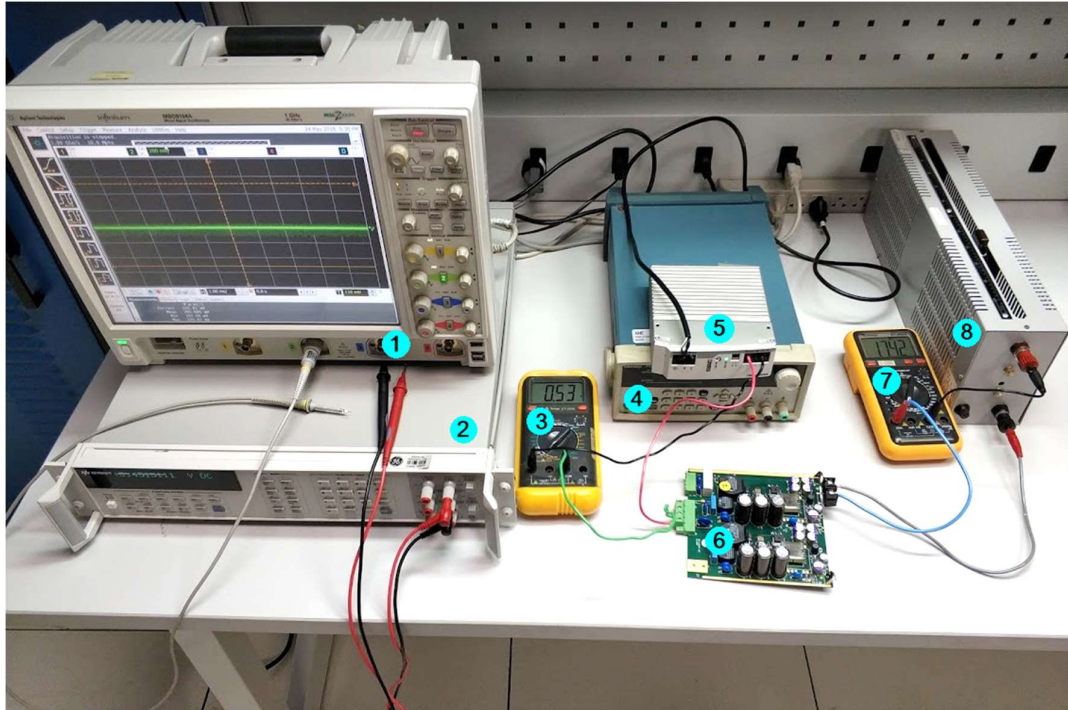


Figura 32. Bancada de testes para procedimento manual. Fonte sob teste SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

A seguir são descritos os itens numerados da Figura 32:

1. Osciloscópio. Fabricante Agilent, modelo MSO9104A;
2. Multímetro de bancada. Fabricante Keysight, modelo 3458A;
3. Multímetro portátil. Fabricante Minipa, modelo ET-2042D;
4. Fonte programável 0 – 32 V. Fabricante Tektronix, modelo PWS4323;
5. Fonte 48 V cc. Fabricante Phoenix, modelo 2903159;
6. Fonte sob teste SFF48LDC_v02;
7. Multímetro portátil. Fabricante Minipa, modelo ET-2650B;
8. Reostato 500 W. Fabricante ELETELE, modelo N12S.

Por se tratar de uma fonte CC-CC, foi possível utilizar dois multímetros comuns portáteis para as medições de corrente na entrada (Item 3) e saída (Item 7). Um terceiro multímetro (Item 2) é utilizado para a medição das tensões de entrada e saída de forma sequencial. O osciloscópio é utilizado somente para a medição do *ripple* da tensão de saída.

A tensão de alimentação pode ser 24 V cc (Item 4) e 48 V cc (Item 5), dependendo da fonte externa utilizada no momento do teste. Esses valores são as tensões nominais da fonte.

Neste cenário de teste, o multímetro (Item 2) é utilizado na função “tensão contínua” e é utilizado para fazer as medições de tensão da entrada e saída da fonte.

O reostato é ajustado de maneira similar à utilizada na seção 5.2.1. Resolvendo a equação (10) para as condições de 24 W e 48 W têm-se os seguintes resultados:

$$R_{24W} = 6 \Omega$$

$$R_{48W} = 3 \Omega$$

Na prática, a tensão da fonte pode variar um pouco do valor nominal, logo um novo cálculo deve ser feito utilizando o valor obtido através de medição. Neste caso a tensão está um pouco mais alta que o valor nominal, ficando em torno de 13,4 V cc sem carga e 12,3 V cc com carga. Dessa forma, têm-se os valores de carga calculados para 12,3 V cc:

$$R_{24W} = 6,3 \Omega$$

$$R_{48W} = 3,15 \Omega$$

O ajuste do reostato não é tão preciso como seria se fosse com uma carga CC. Foi tentado o melhor ajuste onde os resultados do teste são apresentados na Tabela 30.

Tabela 29. Resultados da aquisição de dados manual da fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Fonte CC modelo SFF48LDC_v02							
Carga Nominal	Carga Real (Ω)	Tensão (V cc)	Tensão Entrada (V cc)	Corrente Entrada (A)	Tensão Saída (V cc)	Corrente Saída (A)	Ruído Saída (mV)
0%	-	24	23,93	0,0322	13,47	-	120
50%	7,05	24	23,73	1,10	12,46	1,74	311
100%	3,63	24	23,73	2,24	12,28	3,47	1670
0%	-	48	48,18	0,0162	13,40	-	225
50%	7,05	48	48,16	0,53	12,33	1,76	267
100%	3,63	48	48,14	1,02	12,22	3,47	527

Uma série de resultados são obtidos a partir da manipulação dos dados da Tabela 30. Estes resultados são apresentados a seguir.

1. Eficiência

A eficiência é calculada conforme descrito na seção 2.2.4. Diferentemente da fonte DWPS60, a eficiência da fonte SFF48LDC é a simples razão da potência de saída pela potência de entrada. O resultado do teste é apresentado na Tabela 31.

Tabela 30. Eficiência, teste manual SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V cc)	Corrente Entrada (A)	Tensão Saída (V cc)	Corrente Saída (A)	Potência Entrada (W)	Potência Saída (W)	Eficiência (%)
23,73	1,1	12,46	1,74	26,103	21,6804	83,1
23,73	2,24	12,28	3,47	53,1552	42,6116	80,2
48,16	0,53	12,33	1,76	25,5248	21,7008	85,0
48,14	1,02	12,22	3,47	49,1028	42,4034	86,4

2. Consumo Máximo

Conforme descrito na seção 2.2.5 e exemplificado na seção 5.2.1, o consumo máximo é obtido pela simples avaliação do maior valor de corrente obtido da Tabela 30. O resultado é replicado na Tabela 32, por conveniência.

Tabela 31. Consumo máximo, teste manual SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V cc)	Corrente Saída (A)	Consumo Máximo (A)
23,73	3,47	2,24

3. Consumo em *stand-by*

Este teste é abordado na seção 2.2.7 e também foi exemplificado no estudo de caso 1 (5.2.1). Os resultados na Tabela 33 são expressos em função do nível de tensão de entrada.

Tabela 32. Consumo em stand-by, teste manual SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V cc)	Consumo stand-by (W)
23,93	0,77
48,18	0,78

4. Regulação de carga

A regulação de carga foi apresentada na seção 2.2.11 e exemplificada na seção 5.2.1, a regulação de carga é apresentada na Tabela 34.

Tabela 33. Regulação de carga, teste manual SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Tensão Nominal (V)	Regulação de Carga (%)
24 V cc	9,69
48 V cc	9,66

5. Regulação de linha

Aplicando a equação (2) com os dados da tabela 30, tem-se o resultado a seguir para os três níveis de carga testados. Outro exemplo de aplicação da equação está disponível na seção 5.2.1 – teste manual do estudo de caso 1.

Tabela 34. Regulação de linha, teste manual SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Corrente Saída	Regulação Linha
0%	0,29%
50%	0,53%
100%	0,25%

6. Ruído da tensão de saída

O ruído da tensão de saída foi medido conforme descrito na seção 2.2.13. Os resultados podem ser obtidos diretamente da Tabela 30, última coluna. Por conveniência os resultados são replicados na Tabela 36.

Tabela 35. Ruído da tensão de saída, teste manual SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Tensão Entrada (V)	Corrente Saída (A)	Ruído Saída (mV)
23,93	-	120
23,73	1,74	311
23,73	3,47	1670
48,18	-	225
48,16	1,76	267
48,14	3,47	527

Os resultados dos testes até este estágio foram todos obtidos com base nos dados da Tabela 30. Agora serão apresentados os resultados dos testes que exigem diferentes conexões e configurações dos equipamentos de teste.

7. Corrente de partida

Para a medição da corrente de partida, foi utilizado um resistor *shunt* de 15 mΩ, conforme método descrito na seção 2.2.6. A medição da corrente de partida foi realizada para os dois níveis de tensão de entrada e os resultados são apresentados nas figuras abaixo.

A Figura 33 mostra a forma de onda da corrente de partida da fonte SFF48LDC alimentada em 48 V cc. As configurações da ponteira foram modificadas para inserir o ganho da relação da Lei de OHM e dessa forma expressar diretamente a forma de onda da corrente na tela do osciloscópio.

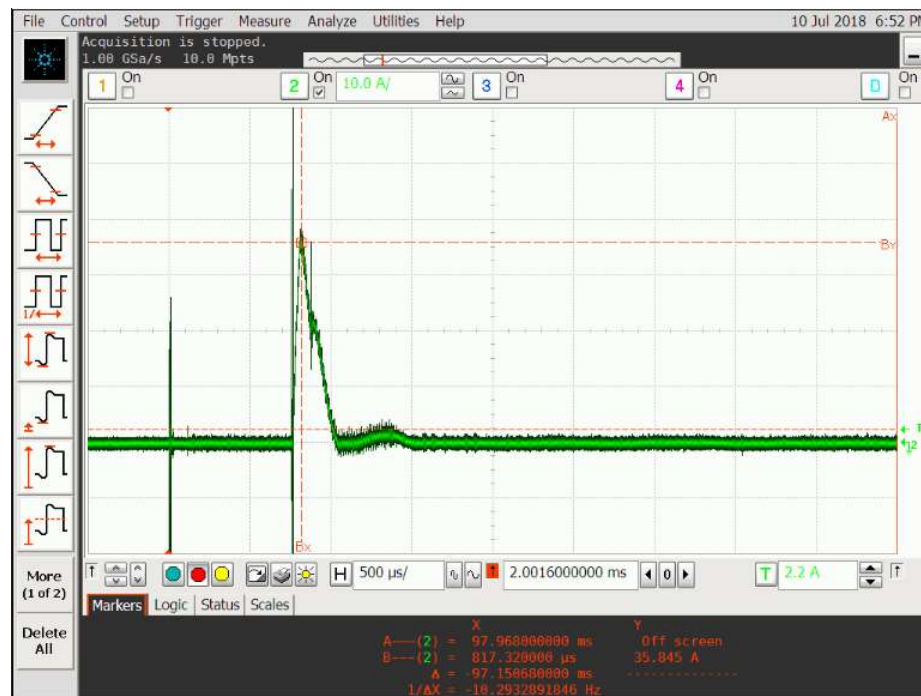


Figura 33. Corrente de partida em 48 V cc, fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

A leitura da corrente de partida na Figura 33 é indicada pelo marcador B, no eixo Y. O valor é apresentado na Tabela 37, juntamente com o resultado do teste em 24 V cc.

Tabela 36. Resultado do teste de corrente de partida, fonte SFF4LDC. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada (V cc)	Corrente de partida (A)
24	13,95
48	35,84

8. Tempo de sustentação

A medição do tempo de sustentação (*hold-up time*) foi realizada de acordo com o exposto na seção 2.2.8. Como o osciloscópio utilizado não possui canais isolados foi necessário utilizar o mesmo artifício utilizado na seção 5.2.1. A conexão é ilustrada na Figura 34.

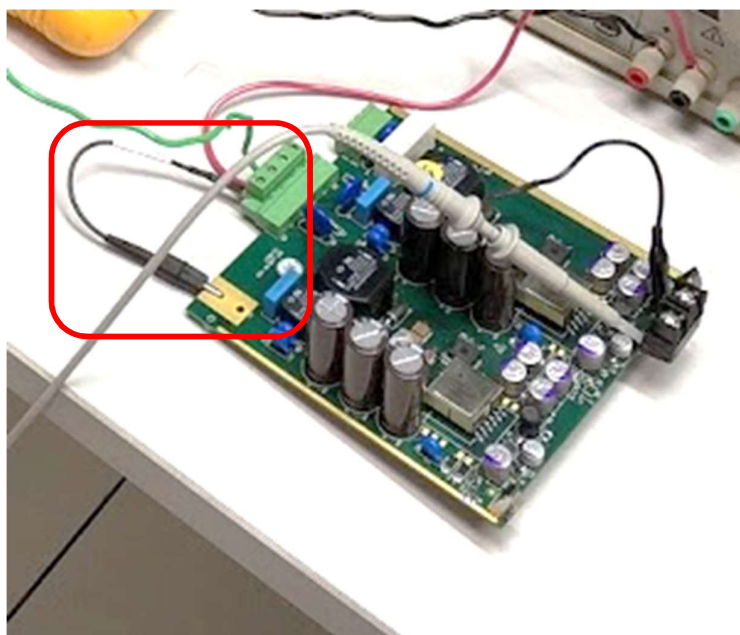


Figura 34. Conexão adicional para uso de osciloscópio não isolado. Fonte: Próprio autor

Este teste é realizado para os dois níveis de tensão de entrada com meia carga e carga nominal. O resultado da medição em 24 V cc e com meia carga é ilustrado na Figura 35.

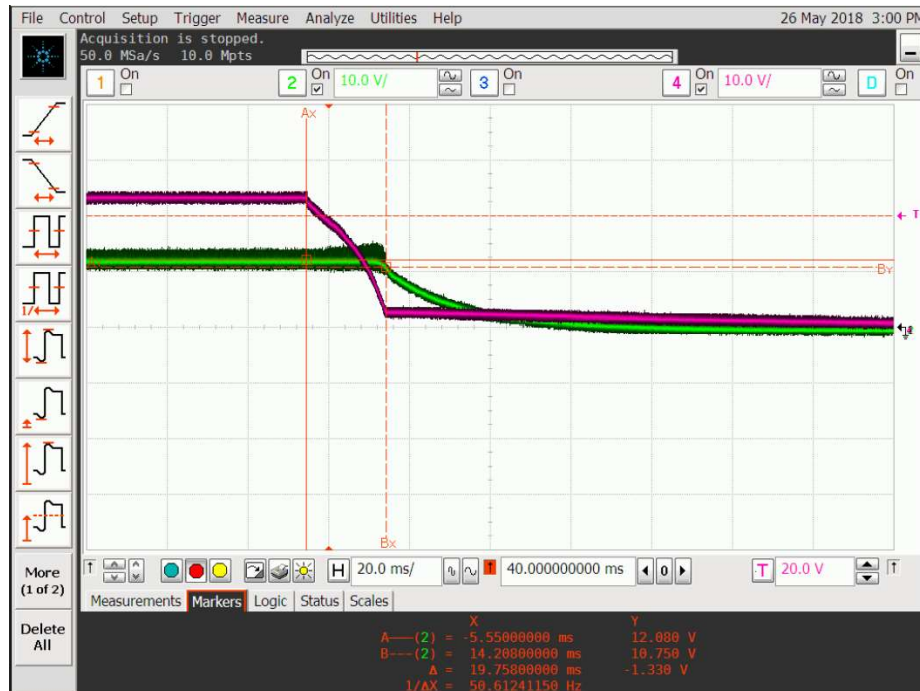


Figura 35. Tempo de sustentação para 24 V cc e 50% de carga, teste manual fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

A leitura do tempo de sustentação é feita na parte inferior da Figura 35, onde encontram-se os dados de posicionamento dos cursores A e B. O tempo de sustentação é o valor do Delta (Δ) no eixo X. O resultado deste teste, assim como os outros resultados são apresentados na Tabela 38.

Tabela 37. Resultado do teste de tempo de sustentação, fonte SFF4LDC. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada (V cc)	Carga (%)	Tempo de sustentação (ms)
24	50	19,75
24	100	8,60
48	50	83,47
48	100	40,51

9. Resposta dinâmica à variação de carga

Este teste foi realizado para as duas variações de tensão de entrada e sempre partindo da condição de operação sem carga para 50% ou 100% de carga. A forma de onda resultante deste teste é apresentada na Figura 36 onde foi testado o conversor partindo da condição sem carga para a carga nominal.



Figura 36. Resposta dinâmica para 48 V cc e 100% de carga, teste manual fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

A diferença de tensão de saída visualizada na Figura 36 é típica de conversores estáticos. Quando o conversor está na condição de operação sem carga, a tensão de saída fica um pouco maior quando comparada com a tensão da situação de carga nominal. Tal fenômeno acontece devido à forma como o circuito de realimentação funciona além de outras características próprias da topologia de conversão.

O resultado da medição da Figura 36 também é obtido através do uso dos cursores na opção (Δ) – eixo x. Os resultados de cada teste serão apresentados na Tabela 39.

Tabela 38. Resultados Resposta dinâmica, fonte SFF48LDC. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada (V cc)	Carga (%)	Resposta dinâmica (ms)
24	50	4,95
24	100	5,50
48	50	4,50
48	100	4,60

10. Tempo de inicialização

O tempo de inicialização da fonte DWPS60_v01 é medido conforme visto na seção 2.2.9 para os diferentes níveis de tensão da entrada. A Figura 37 mostra o tempo de inicialização da fonte SFF48LDC quando alimentada com 48 V cc.



Além do teste em 48 V cc, apresentado na Figura 37, também foi feita a medição na condição de alimentação em 24 V cc. Ambos os resultados são apresentados na Tabela 40.

Tabela 39. Resultados tempo de inicialização, fonte SFF48LDC. Fonte: Próprio autor

Tensão de entrada (V cc)	Tempo de inicialização (ms)
24	59,49
48	34,47

O tempo total de testes da fonte SFF48LDC_v02 seguindo a metodologia atual de testes foi de aproximadamente 5 horas considerando todos os ajustes entres os testes e os testes em si. Este tempo não leva em consideração a obtenção dos resultados e a criação de relatório. Para estas atividades, pode-se considerar mais 6 horas. Dessa forma, o tempo total para realizar todos os testes manuais é de aproximadamente 1 dia e meio (12h).

5.3.2. Testes – protótipo DR60 modificado

A fonte SFF48LDC_v02 foi testada também utilizando o protótipo desenvolvido neste trabalho, conforme definido na metodologia de testes apresentada no início da seção 5.

Os testes foram realizados de acordo com o procedimento apresentado na seção 4.4. O *setup* do teste é ilustrado na Figura 38 com as indicações dos equipamentos utilizados.

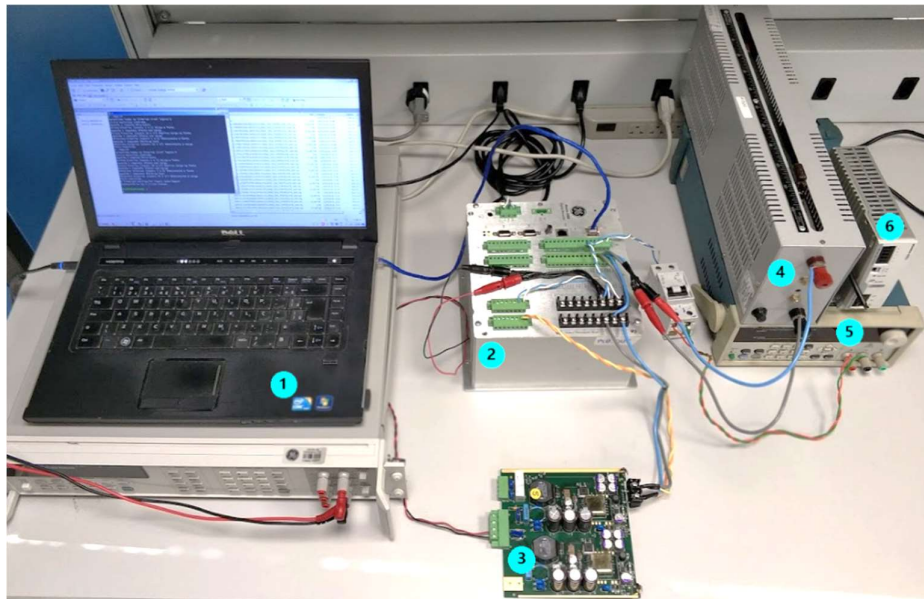


Figura 38. *Setup* do teste com protótipo, fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Legenda dos itens da Figura 38:

1. Computador;
2. Protótipo DR60;
3. Fonte SFF48LDC_v02;
4. Reostato 500 W. Fabricante ELETELE, modelo N12S;
5. Fonte programável 0 – 32 V. Fabricante Tektronix, modelo PWS4323;
6. Fonte 48 V cc. Fabricante Phoenix, modelo 2903159.

De maneira similar ao apresentado na seção 5.2.2, foram gerados 8 arquivos *COMTRADE* de modo a testar as diferentes condições de carga e tensão de entrada. Os registros de longa duração das duas tensões de teste (24 e 48 V cc), na condição de 100% de carga, são apresentados a seguir enquanto os demais resultados são apresentados na Tabela 41.

24 V cc e 100% de carga – *COMTRADE* de longa duração

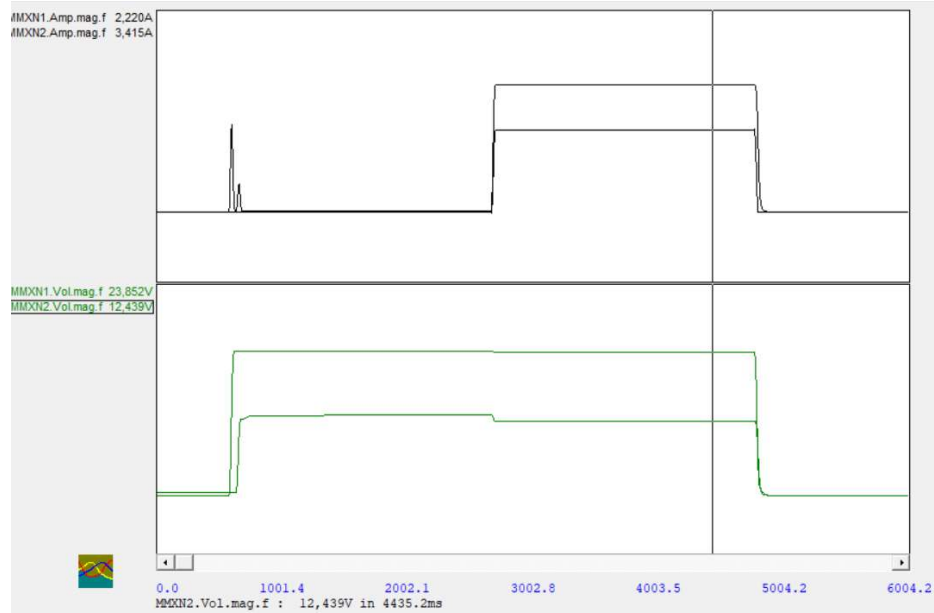


Figura 39. Visualização *COMTRADE* de longa duração. Medição em 24 V cc e 100% de carga, fonte SFF48LDC_v02.

Fonte: Próprio autor

48 V cc e 100% de carga – *COMTRADE* de longa duração

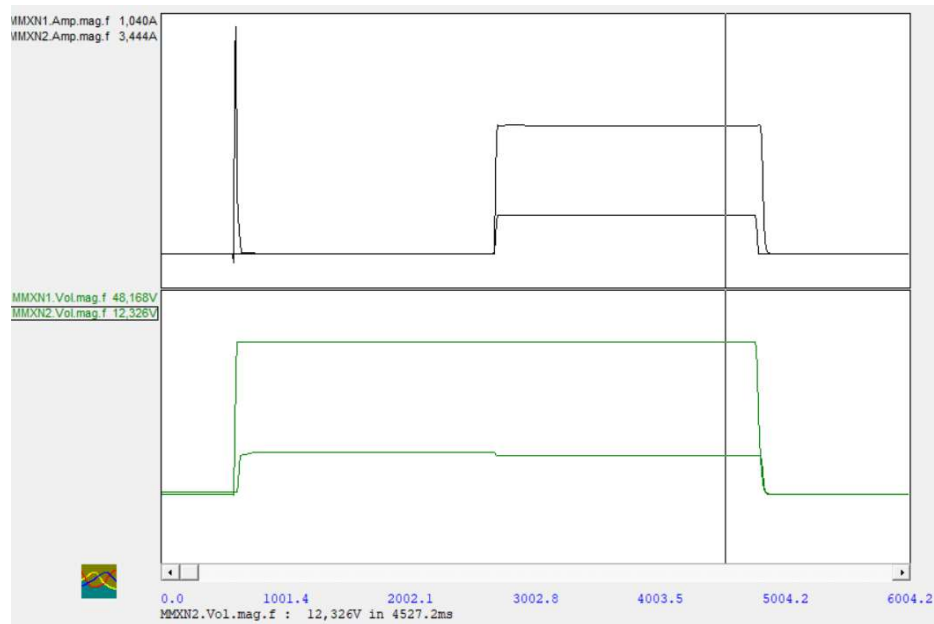


Figura 40. Visualização *COMTRADE* de longa duração. Medição em 48 V cc e 100% de carga, fonte SFF48LDC_v02.

Fonte: Próprio autor

Os arquivos *COMTRADE* referentes a cada condição de teste foram analisados conforme seção 4.6 e os resultados foram inseridos na planilha de cálculo de acordo com as sugestões da planilha. Os resultados são apresentados na Tabela 41.

Tabela 40. Resultados do teste com protótipo, fonte SFF48LDC_V02. Fonte: Próprio autor

Carga Nominal	Tensão Nominal (V cc)	Tensão entrada (V cc)	Corrente entrada (A)	Tensão saída (V cc)	Corrente saída (A)	Tempo sustentação (ms)	Resposta dinâmica (ms)	Tempo de partida (ms)	Corrente de partida (A)
0%	24	24,08	0,036	13,42	0	na	na	na	na
50%	24	23,96	1,123	12,55	1,79	18,9	7,3	58,4	11,12
100%	24	23,85	2,222	12,44	3,41	7,9	6,9	na	na
0%	48	48,29	0,023	13,41	0	na	na	na	na
50%	48	48,22	0,54	12,42	1,77	84,1	6,6	31,7	21,36
100%	48	48,16	1,04	12,33	3,45	40,7	6,7	na	na

Conforme verificado na seção 5.1.3, os dados do teste podem ser melhorados através da compensação do erro sistemático. A planilha de cálculo já faz a correção para o cálculo de todos os testes. Os resultados corrigidos são apresentados na Tabela 42.

Tabela 41. Resultados corrigidos do teste com protótipo, fonte SFF48LDC_v02. Fonte: Próprio autor

Carga Nominal	Tensão Nominal (V)	Tensão entrada (V)	Corrente entrada (A)	Tensão saída (V)	Corrente saída (A)
0%	24	23,95	0,029	13,31	0
50%	24	23,83	1,116	12,44	1,783
100%	24	23,72	2,215	12,33	3,403
0%	48	48,16	0,016	13,30	0
50%	48	48,09	0,533	12,31	1,763
100%	48	48,03	1,033	12,22	3,443

A Tabela 42 apresenta apenas os valores corrigidos. Os resultados de todos os testes são gerados automaticamente em formato de relatório e estão disponíveis no Apêndice C.

O tempo de aquisição de dados foi de aproximadamente 8 min, enquanto que a etapa de análise e relatório levaram 1 hora para sua conclusão. Considerando ainda a montagem da bancada e demais ajustes de cabos e conectores, obtêm-se o tempo total de testes de aproximadamente 1 hora e 30 minutos.

5.4. Comparativo dos métodos

Uma lista contendo 13 testes foi apresentada na seção 2.2. Os testes da lista são os mais relevantes quando se trata de avaliação funcional dos principais conversores estáticos utilizados como fonte de alimentação de equipamentos industriais.

A capacidade de execução de testes de cada método é apresentada na Tabela 43 onde é possível comparar as diferenças entre os modelos de fontes e métodos de avaliação.

Tabela 42. Comparação da capacidade de teste das metodologias estudadas. Fonte: Próprio autor

Teste		Fonte CA Manual	Fonte CA DR60	Fonte CC Manual	Fonte CC DR60
Verificação das potências	Potência Ativa	não	sim	sim	sim
	Potência Reativa	não	sim	-	-
	Potência Aparente	sim	sim	-	-
Fator de potência		não	sim	-	-
Distorção harmônica		não	sim	-	-
Eficiência	CA	não	sim	-	-
	CC	sim	sim	sim	sim
Consumo máximo		sim	sim	sim	sim
Corrente de partida		sim	sim	sim	sim
Potência stand-by		sim	sim	sim	sim
Tempo de sustentação		sim	sim	sim	sim
Tempo de inicialização		sim	sim	sim	sim
Resposta transição de carga		sim	sim	sim	sim
Regulação de carga		sim	sim	sim	sim
Regulação de linha		sim	sim	sim	sim
Ruído tensão de saída		sim	não	sim	não
Fator de crista		-	sim	-	-

Analisando a Tabela 43 é possível perceber que a capacidade de execução de testes do protótipo DR60 é bem melhor para conversores CA-CC. Para este tipo de conversor, o protótipo só não é capaz de realizar o teste de ruído da tensão de saída. Entretanto, para conversores CC-CC o protótipo perde por não conseguir realizar o teste de ruído da tensão de saída.

Além do comparativo de capacidade de execução de testes também foi realizado um comparativo dos resultados obtidos com cada método. O comparativo é apresentado na Tabela 44.

Tabela 43. Comparativo dos resultados numéricos de cada método. Fonte: Próprio autor

Teste		Fonte CA	Fonte CA	Fonte CC	Fonte CC
		Manual	DR60	Manual	DR60
Verificação das potências	Potência Ativa (W)	74,68	71,55	49,10	49,61
	Potência Reativa	-	-	-	-
	Potência Aparente (VA)	127,23	112,35	-	-
Fator de potência		-	-	-	-
Distorção harmônica		-	-	-	-
Eficiência	CA	-	-	-	-
	CC (V)	77,60	79,80	86,40	84,80
Consumo máximo (A)		1,07	0,93	2,24	2,22
Corrente de partida (A)		11,03	12,24	35,84	21,36
Potência stand-by (W)		1,00	1,00	0,78	0,77
Tempo de sustentação (ms)		11,10	11,90	40,51	40,70
Tempo de inicialização (ms)		84,10	96,50	34,47	31,70
Resposta transição de carga (ms)		19,20	24,10	4,60	6,70
Regulação de carga (%)		0,59	0,59	9,66	8,84
Regulação de linha (%)		0,00	0,02	0,25	0,45
Ruído tensão de saída		-	-	-	-
Fator de crista		-	-	-	-

Conforme pode ser observado na Tabela 44, os testes que não possuem resultados numéricos são testes em que apenas um dos métodos é capaz de executar ou por que o teste não se aplica ao tipo de fonte. Percebe-se, também, que alguns testes apresentam resultados muito próximos ou até iguais. Nesses casos, a confiança de que o resultado reflete a realidade da fonte é maior. Já nos casos em que a diferença foi muito expressiva – corrente de partida da fonte cc, por exemplo – acredita-se que a fonte pode ter apresentado uma condição um pouco diferente em cada um dos testes. Isso é bem provável de acontecer, especialmente em medições de tempo entre eventos e de magnitude de sinais transitórios. Para os demais casos têm-se a diferença intrínseca de cada método de medição, diferenças relacionadas a carga e de flutuações na tensão da rede, além da influência do operador.

Um comparativo entre os métodos analisando a quantidade de equipamentos e acessórios necessários para a realização dos testes mostra que a solução desenvolvida neste trabalho necessita de menos equipamentos auxiliares. A quantidade de equipamentos varia de

acordo com o tipo de fonte sob teste. Conforme visto nas seções anteriores, os testes em conversores CA-CC necessitam de mais equipamentos em comparação com os conversores CC-CC. Pode-se dizer que, em média, o método desenvolvido com o protótipo do DR60 necessita de 3 equipamentos a menos que o método manual utilizado atualmente. Além de necessitar de menos equipamentos, o método sugerido chega a ser aproximadamente 87% mais rápido que o método atual.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o protótipo modificado do registrador digital de perturbações DR60, juntamente com a análise da seção 5.5, mostraram que é possível utiliza-lo como ferramenta de teste de fontes chaveadas pois, com seu uso, o escopo de testes é bem mais completo, mais simples e mais rápido.

Duas fontes foram testadas com sucesso, mostrando que o protótipo pode ser utilizado na avaliação de conversores CA-CC e CC-CC desde que dentro das características elétricas apresentadas na seção 3.3. Embora somente fontes chaveadas tenham sido testadas, é possível que outros tipos de conversores estáticos sejam testados de forma similar, necessitando ou não de modificações no *script* de teste.

Através da avaliação dos resultados dos ensaios e estudos de caso realizados neste trabalho, é possível verificar que o protótipo desenvolvido apresenta diversas características que o tornam uma boa ferramenta para o teste de fontes chaveadas.

A primeira característica é a velocidade de teste. As medições obtidas com o auxílio do protótipo, juntamente com a planilha de cálculo e relatório, permitem executar mais testes em menos tempo. A diferença do tempo total de testes entre o protótipo e o método atual de testes é de aproximadamente 87%. Isso significa obter uma bateria completa de testes em menos de 2 horas já com relatório de resultados.

Conforme comentado, o protótipo permite realizar mais testes do que é possível fazer com a metodologia atual. Os testes adicionais aumentam a capacidade de testes de fontes e conversores que operam com corrente alternada, que antes era muito limitada. Trata-se de uma grande contribuição para o setor de desenvolvimento da linha de produtos Reason da GE.

A segunda característica do uso da solução desenvolvida é a simplificação que ela traz ao processo de teste. A montagem do *setup* de testes necessita de menos equipamentos, a configuração dos equipamentos é mais simples e o processo de aquisição de dados é automático e controlado pelo computador.

A terceira característica é relativa ao ganho expressivo na capacidade de avaliação do conversor, pois o protótipo permite uma análise visual de como o conversor reage em cada etapa do teste. Isso é possível graças à capacidade do DR60 de registrar digitalmente as formas de onda durante todo a rotina de teste. Os registros contendo os dados de aquisição podem ser armazenados para consulta caso algum teste necessite ser revisado evitando retrabalho.

A quarta característica do uso do protótipo está no fato de que não há mais necessidade de contato com a fonte energizada. No procedimento manual de testes, é necessário que o operador faça as aferições de tensão da entrada e da saída utilizando as ponteiros do multímetro. Esta aferição exige cuidados e sempre envolve um certo risco. Mesmo o protótipo sendo construído pensando na segurança do operador, e o processo de medição não envolvendo contato direto com a fonte enquanto energizada, é preciso ter cuidado no manuseio pois conversores possuem capacitores que podem possuir carga residual.

Com relação à confiabilidade dos resultados dos testes utilizando o protótipo, pode-se dizer que todos os testes apresentam bastante coerência com a teoria e se assemelham aos resultados obtidos pela metodologia atual de testes. A comparação realizada na seção 5.4 permite a visualização do desempenho de cada método. Entretanto, o ideal seria submeter ambos os conversores ensaiados à algum laboratório de qualidade certificada para obter uma comparação mais qualitativa sobre os dois métodos abordados.

Não se pode, também, deixar de mencionar a diferença de capacidade de aquisição de um bom osciloscópio com a disponível no hardware do DR60. O osciloscópio utilizado no teste manual possui taxa de amostragem de 20 bilhões de amostras por segundo, enquanto que o DR60 possui taxa de amostragem de cerca de 30 mil amostras por segundo. Trata-se de uma diferença bastante expressiva e que faz com que determinadas variações muito rápidas de tensão ou corrente não sejam apresentadas nos arquivos *COMTRADE* gerados pelo DR60.

Mesmo com uma taxa bem menor de amostragem, os resultados do protótipo se mostraram bastante satisfatórios para fins de desenvolvimento. Dessa forma, entende-se que a solução desenvolvida com base no registrador DR60 é uma boa ferramenta de testes de fontes chaveadas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas oportunidades foram identificadas durante o desenvolvimento deste trabalho. A criação de um aplicativo com interface gráfica simples e intuitiva permitiria que profissionais menos familiares com linhas de comando pudessem aprender como utilizar o equipamento de forma muito mais rápida e confortável.

Outra oportunidade de melhoria identificada está na geração do relatório. Conforme visto ao longo do texto, os dados devem ser obtidos manualmente do software *Analise* e inseridos na planilha de cálculo. A sugestão é desenvolver um script (ou incorporar essa função ao aplicativo sugerido acima) que realize a obtenção dos dados de forma totalmente automática diretamente dos arquivos COMTRADE. Essa tarefa envolve bastante esforço de programação pois se faz necessário a interpretação dos dados de acordo com a norma IEEE. C37.111.

Sugere-se, também, melhorar a etapa de configuração do DR60 através do desenvolvimento de uma solução que atualize automaticamente a licença do equipamento. Atualmente esse processo é manual e pouco intuitivo, pois exige nova atualização de cada arquivo através de linhas de comando, conforme descrito na seção 4.1. Tal solução também poderia ser adicionada ao aplicativo sugerido.

Com relação ao hardware sugere-se o desenvolvimento de uma interface de adaptação das ligações elétricas. Esta interface pode conter etiquetas e conectores identificados para permitir maior facilidade na utilização do equipamento.

Como o protótipo não pôde ser comparado com um método de medição de maior confiabilidade, sugere-se que essa comparação seja feita de modo a comprovar sua eficácia. A sugestão é testar uma fonte CA-CC com a metodologia descrita neste trabalho e depois testar a mesma fonte em um laboratório especializado e acreditado por algum órgão de credibilidade reconhecida.

8. REFERÊNCIAS

COURY, Denis Vinicius; OLESKOVICZ, Mário; GIOVANINI, Renan. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: Dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**. São Carlos: Edusp, 2007.

ROZENFELD, Henrique [et.al.]. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542 p., il. ISBN 8502054465. - 9788502054462.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 7.ed. FLORIANÓPOLIS: Edição do autor, 2012. 498p.

COMACCIO, A. Faria. [et.al.]. **Norma IEC 61850: testes de velocidade das mensagens GOOSE**. ELETRICIDADE MODERNA, v. MAIO 2017, p. 26-35, 2017.

IEC 61850-2, **Communication networks and systems for power utility automation - Part 1: Introduction and overview**

KEYSIGHT (USA). **IntegraVision PA2200 Series Power Analyzers**. 2017. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-0324EN.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2018.

FLUKE. **Fluke 430 Series II: Three-Phase Power Quality and Energy Analyzers**. 2012. Disponível em: <http://media.fluke.com/documents/2643006_6112_ENG_D_W.PDF?_ga=2.266383566.1957667709.1527819898-2003350841.1523744138>. Acesso em: 05 mai. 2018.

RAY RIDLEY. **[054] Hardware Testing and Computer Simulation**. Disponível em: <<http://ridleyengineering.com/design-center-ridley-engineering/43-testing/95-054-hardware-testing-and-computer-simulation.html>>. Acesso em: 06 maio 2018.

HANRAHAN, Robert. **Testing a power supply (Part 1)**. 2013. Disponível em: <<https://www.edn.com/design/power-management/4411146/Testing-a-power-supply--Part-1->>. Acesso em: 18 maio 2018.

KASSICK, Enio et al. **Aula 07 - potência monofásica e fator de potência**. 2008. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/circuitos1/Aula07E.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

HIOKI (Japão). **Power Meter PW3336/PW3337: High-Precision 3-phase Power testing.** 2013. Disponível em:

<https://www.ltm.as/components/com_redshop/assets/document/extracfields/1371627182PW3337E1-34E.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2018.

CHROMA. **Switching Power Supply ATS Model 8000.** Disponível em: <http://www.chromaate.com/product/smps_ats_8000.htm>. Acesso em: 05 maio 2018.

NH RESEARCH (USA). **Power Supply Functional Test System: Adapter/Converter Test 400 Series.** Disponível em: <<https://nhresearch.com/wp-content/uploads/data-sheet-power-supply-production-tester-series-400-Series.pdf>>. Acesso em: 06 mai. 2018.

TEIXEIRA FILHO, Faete Jacques. **Estação de testes e de geração de relatórios para uso em linha de produção de fontes chaveadas.** 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2006.

OLIVEIRA, Andre Mendes de. **Jiga automática para testes de fontes chaveadas.** 2012. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2012.

RODRIGUES, Carlos Eduardo Bevilacqua. **Jiga automática para testes de fontes chaveadas.** 2009. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Cap. 74.

OLIVEIRA, Mauricio L. **Teste de Fonte de Alimentação.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <mauricio@tminstruments.com.br>. em: 17 maio 2018.

GONÇALVES, Eduardo. **Quote Request from NH Research Website.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <goncalves@ohmini.com.br>. em: 24 abr. 2018.

GE GRID SOLUTIONS. **DR60 Digital Recorder: Technical Manual.** 2017. Disponível em: <https://www.gegridsolutions.com/products/manuals/AlstomEnergy/Measurement/DR60_TM_EN_2.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2018.

BASH Reference Manual. 2016. Disponível em: <<https://tiswww.case.edu/php/chet/bash/bashref.html>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

REASON TECNOLOGIA S.A. (Brasil). **Análise: Manual de Referência**. 2. ed. Florianópolis: Reason, 2005. 41 p.

CRANDALL, Earl. **Power supply testing handbook**: strategic approaches in test cost reduction. Singapura: Springer-sc/ence+business Media, B.v, 1997.

C. S. MITTER. **Active inrush current limiting using MOSFETs**. Arizona: Motorola, 1995

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-4-11**: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests. 2.1 ed. [s. L.]: Iec, 2010

WEIK, Martin. **Computer Science and Communications Dictionary**. Boston: Springer, 2000.

POMILIO, José Antenor. **Caracterização de fontes chaveadas**. Campinas: Unicamp, 2014.

ANDERSON, Lars; BRUNNER, Christoph; ENGLER, Fred. **Substation Automation based on IEC 6 1850 with new process-close Technologies**. Bologna: Ieee, 2003.

DAS, Shantanu; SUDHAKAR, P.. **Power Factor Correction & Harmonic Distortion Control for AC-DC Fault Tolerant Power Distribution System & Power Quality Qualification Test Results as per IEC 61000-3-2**. Disponível em: <<http://www.barc.gov.in/publications/nl/2017/2017030404.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

GE POWER. **About ge power**. Disponível em: <<https://www.ge.com/power/about>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

IEEE. **C37.111-1999 - IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems**. [s. L.]: Ieee, 1999. 55 p. (R2005).

KEYSIGHT. **Keysight 3458A Multimeter**: Shattering performance barriers of speed and accuracy. USA: Keysight Technologies, 2014.

G. JUNIOR, Armando Albertazzi; SOUZA, Andre R. de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Brasil: Manole, 2008.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO *SCRIPT*

O *script* é um arquivo de nome *app.sh* que é localizado no diretório *config/logicas*. Durante a sua execução alguns programas externos são utilizados pelo *script* de forma a criar uma sequência lógica de ações que modificam o estado das saídas digitais durante o funcionamento de uma fonte. Estes programas foram nomeados de acordo com a ordem em que são utilizados pelo *script*. Os arquivos são: *step1.st*, *step2.st*, *step4.st*, *step4.st* e *step5.st*.

Para que o *script* continue funcionando após uma mudança de configuração, faz-se necessário, então, copiar a nova hash no arquivo e substituir a existente em cada um dos arquivos (*step1*, *step2*, *step3*, *step4*, *step5*) utilizados pelo *script*.

A seguir é apresentado o código principal escrito em linguagem *shell script*. Na sequência o código é explicado detalhadamente. O mesmo será feito para cada programa.

Arquivo: *app.sh*

```
#!/bin/bash
echo "Iniciando Teste da Fonte"
echo "Garantindo todas as binarias nivel logico 0"
/bin/softcore-make-write /config/cfg.cid /config/logicas/step1.st
echo "Iniciando aquisicao COMTRADE"
killall -SIGUSR2 instrument
echo "Aguardando 0.5 segundos #Pre-teste"
sleep 0.5
echo "Acionando binarias (canais 1 e 2) #Liga a fonte"
/bin/softcore-make-write /config/cfg.cid /config/logicas/step2.st
echo "Aguardando 2 segundos #Teste sem carga"
sleep 2
echo "Acionando binarias (canais 16 e 17) #Aplica carga na fonte"
/bin/softcore-make-write /config/cfg.cid /config/logicas/step3.st
echo "Aguardando 2 segundos #Teste com carga"
sleep 2
echo "Desacionando binarias (canais 1 e 2) #Desconecta a fonte"
/bin/softcore-make-write /config/cfg.cid /config/logicas/step4.st
echo "Aguardando 3 segundos #Hold-up test"
sleep 3
echo "Desacionando binarias (canais 16 e 17) #Desconecta a carga"
/bin/softcore-make-write /config/cfg.cid /config/logicas/step5.st
echo "Teste concluido"
echo "FIM"
```

A primeira linha *#!/bin/bash* diz ao sistema que o arquivo é um *script shell* cujo interpretador da linguagem de comando é o *bash*. *Bash* é um *Unix shell* e também uma linguagem de comando. Por se tratar de um *Unix shell*, os arquivos contendo comandos se tornam também comandos. Como o arquivo está no diretório */bin* ele possui o mesmo status dos comandos do sistema, o que permite que seja utilizado para enviar comandos diretamente ao sistema de maneira muito prática e intuitiva. (BASH... 2016)

O comando “*echo*” dentro do *script shell* escreve o argumento entre aspas duplas na tela do terminal em que está sendo executado. Dessa forma, todas as linhas do *script* que iniciam com o comando *echo* são apenas comentários para indicar ao usuário cada passo do código.

A quarta linha do *script*, bem como todas as demais iniciadas com */bin/softcore-make-write* são os comandos utilizados para enviar o programa *stepN.st* (onde N varia de 1 a 5, de acordo com a linha) diretamente para ser executado pelo Linux. Ou de forma mais técnica, ambos *cfg.cid* e *step1.st* são passados como argumento para o *softcore-make-write* onde é feito o processamento e enviado para execução.

Já o comando *killall -SIGUSR2 instrument* realiza o trigger manual do *COMTRADE*. Basicamente o comando é identificado pelo Linux que já está preparado para realizar o trigger manual sempre que receber o comando *SIGUSR2*. Lembrando que as características do *COMTRADE* foram definidas no momento da configuração do equipamento.

Por fim, o comando *sleep*, que faz exatamente o que nome sugere, aguarda o tempo (em segundos) definido pelo número que segue o comando antes de executar a próxima linha do *script*.

De forma similar são apresentados os programas *step.st*. Todos os arquivos *step* (do 1 ao 5) possuem exatamente o mesmo início e fim, conforme pode ser visto na sequência.

Arquivo: *step1.st*

```
PROGRAM 3ec43fe719b969dfe65d784c9b143c3f
DIGOUT0 := 0;
DIGOUT1 := 0;
DIGOUT2 := 0;
DIGOUT3 := 0;
DIGOUT4 := 0;
DIGOUT5 := 0;
DIGOUT6 := 0;
DIGOUT7 := 0;
DIGOUT16 := 0;
```

```

DIGOUT17 := 0;
DIGOUT18 := 0;
DIGOUT19 := 0;
DIGOUT20 := 0;
DIGOUT21 := 0;
DIGOUT22 := 0;
DIGOUT23 := 0;
END_PROGRAM

```

A primeira linha possui um *hash* – sequência de 32 algarismos alfanuméricos - que é utilizado como mecanismo de segurança para impedir que programas desconhecidos sejam executados. O *hash* continua válido até que a configuração seja modificada.

As demais linhas do programa são todas as 24 saídas binárias instaladas no equipamento usado como protótipo. No caso de um equipamento com diferente número de saídas, este arquivo deve ser alterado para que não ocorra erro de processamento. Dessa forma o programa *step1.st* é o responsável por garantir que todas as saídas digitais estejam abertas.

O nome de cada saída começa com *DIGITOUT* e é seguido do número correspondente da saída. O operador “:=” representa uma atribuição. Quando tomamos o exemplo *DIGIOUT1 := 0* devemos entender que a variável *DIGIOUT1* está recebendo o valor 0 – que representa o nível lógico 0. Dessa forma, quando o *softcore-make-write* verifica o arquivo *step1.st*, ele atualiza o estado da saída digital com o valor lógico informado.

A mesma explicação técnica se aplica para os demais programas: *step2.st*, *step3.st*, *step4.st* e *step5.st*.

Arquivo: *step2.st*

```

PROGRAM 3ec43fe719b969dfe65d784c9b143c3f
DIGOUT0 := 1;
DIGOUT1 := 1;
END_PROGRAM

```

Note que tanto a primeira quanto a última linha são exatamente iguais em todos os programas *step.st*. O programa *step2.st* é responsável por fechar os contatos dos canais ligados à entrada da fonte sob teste, fazendo com que a mesma seja energizada.

Arquivo: *step3.st*

```

PROGRAM 3ec43fe719b969dfe65d784c9b143c3f

```

```
DIGOUT16 := 1;  
DIGOUT17 := 1;  
END_PROGRAM
```

O programa *step3.st* é responsável por fechar os contatos associados à conexão da carga à saída da fonte. Ou seja, quando executado aplica carga à fonte sob teste.

Arquivo: *step4.st*

```
PROGRAM 3ec43fe719b969dfe65d784c9b143c3f  
DIGOUT0 := 0;  
DIGOUT1 := 0;  
DIGOUT16 := 1;  
DIGOUT17 := 1;  
END_PROGRAM
```

O programa *ste4.st* é similar ao *step2.st* porém dessa vez o valor lógico é 0 pois a intenção é abrir os contatos para interromper a alimentação da fonte. Outra diferença é que foram mantidas as instruções referentes à carga da fonte – note que *DIGIOUT16* e *DIGITOU17* continuam com os mesmos níveis lógicos do programa *step3.st*. Isto é feito apenas para deixar claro a intenção de abrir apenas os canais referentes a entrada.

Arquivo: *step5.st*

```
PROGRAM 3ec43fe719b969dfe65d784c9b143c3f  
DIGOUT16 := 0;  
DIGOUT17 := 0;  
END_PROGRAM
```

O último programa (*step5.st*) é responsável por abrir os contatos associados à carga aplicada na saída da fonte sob teste. Ou seja, com isso é retirada a conexão elétrica entre a saída da fonte e os terminais da carga. Ao final da execução deste programa todas as saídas binárias encontram-se abertas (nível lógico 0) e o teste é finalizado.

APÊNDICE B – RELATÓRIO DE TESTES DO ESTUDO DE CASO 1

Após análise dos arquivos *COMTRADE* e preenchimento da tabela “*Measurements*” da planilha de cálculo é possível extrair o relatório completo com os resultados de todos os testes. O relatório é baseado unicamente nas informações inseridas na planilha de cálculo e, portanto, não necessita de nenhuma edição.



FUNCTIONAL POWER SUPPLY TEST REPORT

Report automatically generated based on measurements from a modified DR60

By: Anderson Augusto Heinz

Ver: 1.0

Report date: 15/11/2018

POWER SUPPLY SPECIFICATION

BOARD MODEL: dwps60_v01
SERIAL NUMBER: -
INPUT VOLTAGE: 110; 220; Vca & 125Vcc
OUTPUT VOLTAGE: 12 V
OUTPUT POWER: 60 W

TEST 1 - INPUT APARENT POWER

Aparent Power =	56,95 VA	110V @ 2,57A Output Load
Aparent Power =	108,72 VA	110V @ 4,776A Output Load
Aparent Power =	65,84 VA	220V @ 2,55A Output Load
Aparent Power =	112,35 VA	220V @ 4,774A Output Load

TEST 2 - OUTPUT POWER

Output Power =	30,78 W	110V @ 2,57A Output Load
Output Power =	57,04 W	110V @ 4,776A Output Load
Output Power =	30,54 W	220V @ 2,55A Output Load
Output Power =	57,11 W	220V @ 4,774A Output Load
Output Power =	30,78 W	125V @ 2,57A Output Load
Output Power =	57,09 W	125V @ 4,78A Output Load

TEST 3 - STANDBY POWER

Standby Power =	2,24 VA	@ 110V
Standby Power =	5,74 VA	@ 220V
Standby Power =	1,00 W	@ 125Vcc

TEST 4 - POWER FACTOR

DISTORTION FACTOR:

Distortion Factor=	0,69	110V @ 2,57A Output Load
Distortion Factor=	0,71	110V @ 4,776A Output Load
Distortion Factor=	0,61	220V @ 2,55A Output Load
Distortion Factor=	0,64	220V @ 4,774A Output Load

POWER FACTOR:

Power factor=	0,68	110V @ 2,57A Output Load
Power factor=	0,69	110V @ 4,776A Output Load
Power factor=	0,60	220V @ 2,55A Output Load
Power factor=	0,64	220V @ 4,774A Output Load

TEST 5 - INPUT ACTIVE POWER

Active Power = 38,65 W 110V @ 2,57A Output Load
 Active Power = 74,84 W 110V @ 4,776A Output Load
 Active Power = 39,55 W 220V @ 2,55A Output Load
 Active Power = 71,42 W 220V @ 4,774A Output Load
 Active Power = 39,68 W 125V @ 2,57A Output Load
 Active Power = 71,55 W 125V @ 4,78A Output Load

TEST 6 - INPUT REACTIVE POWER

Reactive Power = 18,30 VAR 110V @ 2,57A Output Load
 Reactive Power = 33,88 VAR 110V @ 4,776A Output Load
 Reactive Power = 26,29 VAR 220V @ 2,55A Output Load
 Reactive Power = 40,94 VAR 220V @ 2,55A Output Load

TEST 7 - TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD)

THD = 106 % 110V @ 2,57A Output Load
 THD = 100 % 110V @ 4,776A Output Load
 THD = 131 % 220V @ 2,55A Output Load
 THD = 119 % 220V @ 4,774A Output Load

TEST 8 - CREST-FACTOR (CF)

CF = 2,68 110V @ 2,57A Output Load
 CF = 2,79 110V @ 4,776A Output Load
 CF = 2,68 220V @ 2,55A Output Load
 CF = 2,63 220V @ 4,774A Output Load

TEST 9 - LINE REGULATION

Line Regulation = 0,02% @ naA Output Load
 Line Regulation = 0,00% @ 2,57A Output Load
 Line Regulation = 0,02% @ 4,776A Output Load

TEST 10 - LOAD REGULATION

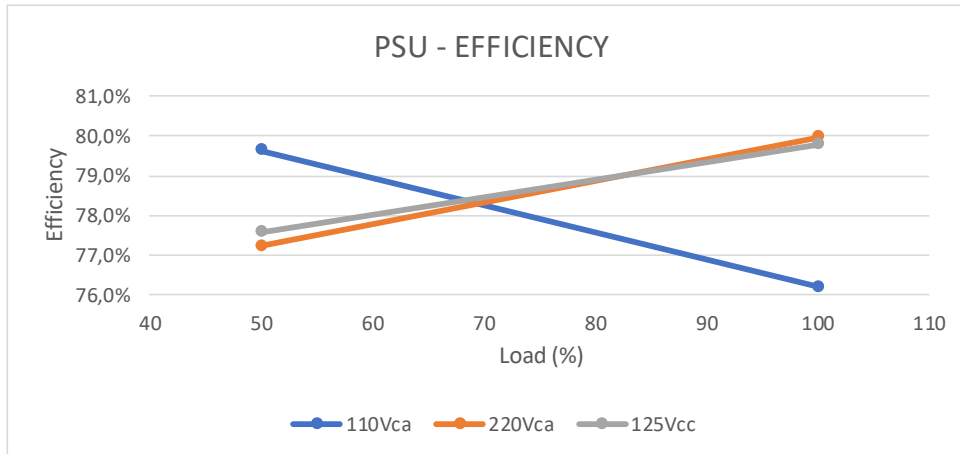
load Regulation = 0,59% @ 110Vac Input Voltage
 load Regulation = 0,58% @ 220Vac Input Voltage
 load Regulation = 0,59% @ 125Vdc Input Voltage

TEST 11 - EFFICIENCY

Raw data

		Load	
		50	100
Input Voltage	110Vca	79,6%	76,2%
	220Vca	77,2%	80,0%
	125Vcc	77,6%	79,8%

Chart



TEST 12 - MAXIMUM CONSUMPTION

I_max= 0,93 A

TEST 13 - START-UP TIME

T_start= 97,1 ms @ 110Vca
 T_start= 96,2 ms @ 220Vca
 T_start= 96,5 ms @ 220Vcc

TEST 14 - LOAD TRANSIENT STEP RESPONSE

T_step= 17,3 ms 110Vca @ 2,57A Output Load
 T_step= 20,4 ms 110Vca @ 4,776A Output Load
 T_step= 17,6 ms 220Vca @ 2,55A Output Load
 T_step= 20,7 ms 220Vca @ 4,774A Output Load
 T_step= 20,5 ms 125Vca @ 2,57A Output Load
 T_step= 24,1 ms 125Vca @ 4,78A Output Load

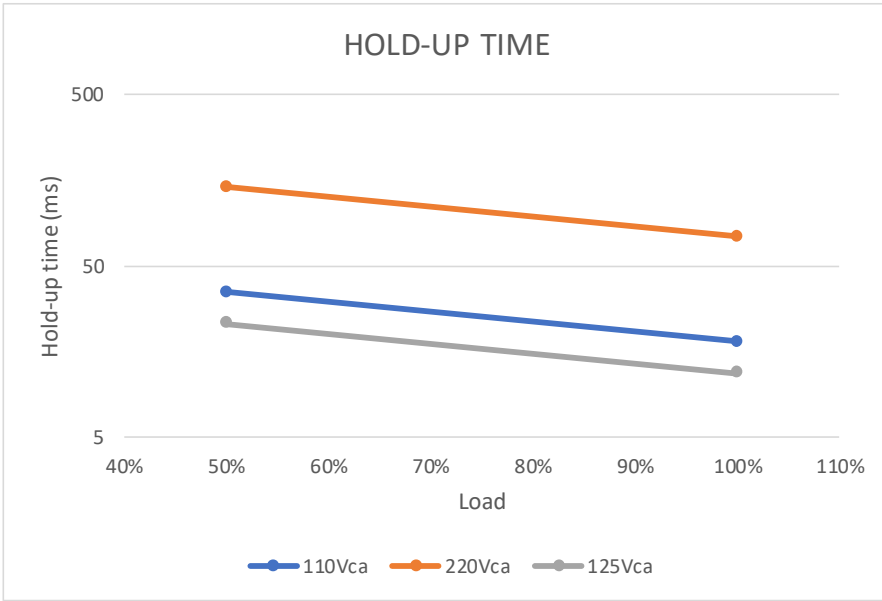
TEST 15 - INRUSH CURRENT

I_inrush = 5,76 A @ 110Vca
 I_inrush = 21,46 A @ 220Vca
 I_inrush = 12,24 A @ 125Vca

TEST 16 - HOLD-UP TIME

Raw data

		Load	
		50%	100%
Input Voltage	110Vca	35,1	18,1
	220Vca	143,2	73,7
	125Vca	23	11,9



NOTES:

APÊNDICE C – RELATÓRIO DE TESTES DO ESTUDO DE CASO 2

Após análise dos arquivos *COMTRADE* e preenchimento da tabela “*Measurements*” da planilha de cálculo é possível extrair o relatório completo com os resultados de todos os testes. O relatório é baseado unicamente nas informações inseridas na planilha de cálculo e, portanto, não necessita de nenhuma edição.



FUNCTIONAL POWER SUPPLY TEST REPORT

Report automatically generated based on measurements from a modified DR60

By: Anderson Augusto Heinz

Ver: 1.0

Report Date: 15/11/2018

POWER SUPPLY SPECIFICATION

BOARD MODEL: SFF_LDC48_v02

SERIAL NUMBER: -

INPUT VOLTAGE: 24 ; 48 Vcc

OUTPUT VOLTAGE: 12 Vcc

OUTPUT POWER: 48 W

TEST 1 - INPUT ACTIVE POWER

Input Power =	26,59 W	24V @ 1,79A Output Load
Input Power =	52,54 W	24V @ 3,41A Output Load
Input Power =	25,63 W	48V @ 1,77A Output Load
Input Power =	49,61 W	48V @ 3,45A Output Load

TEST 2 - OUTPUT POWER

Output Power =	22,18 W	24V @ 1,79A Output Load
Output Power =	41,96 W	24V @ 3,41A Output Load
Output Power =	21,70 W	48V @ 1,77A Output Load
Output Power =	42,07 W	48V @ 3,45A Output Load

TEST 3 - STANDBY POWER

Standby Power =	0,69 W	@ 24V Input Voltage
Standby Power =	0,77 W	@ 48V Input Voltage

TEST 4 - LINE REGULATION

Line Regulation =	0,04%	@ 0A Output Load
Line Regulation =	0,54%	@ 1,79A Output Load
Line Regulation =	0,45%	@ 3,41A Output Load

TEST 5 - LOAD REGULATION

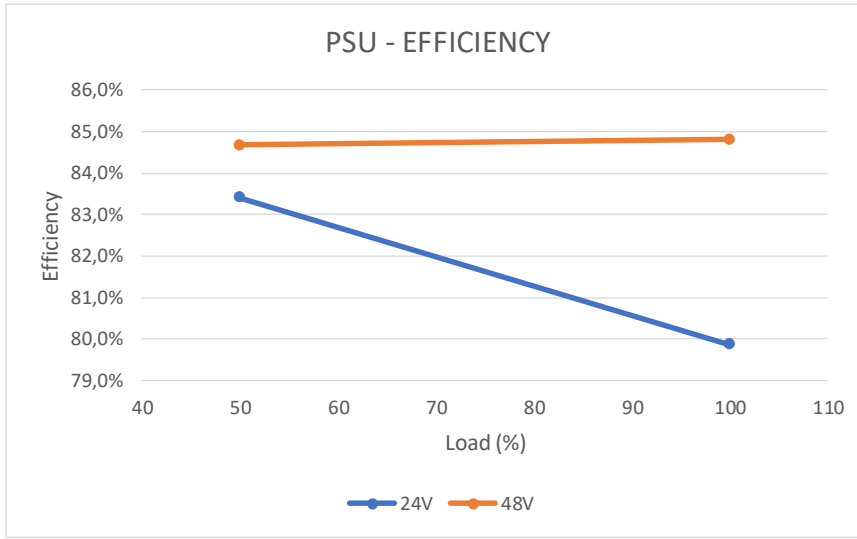
load Regulation =	7,95%	@ 24V Input Voltage
load Regulation =	8,84%	@ 48V Input Voltage

TEST 6 - EFFICIENCY

Raw data

		Load	
		50	100
Input Voltage	24V	83,4%	79,9%
	48V	84,7%	84,8%

Chart



TEST 7 - MAXIMUM CONSUMPTION

I_max= 2,22 A

TEST 8 - START-UP TIME

T_start= 58,4 ms @ 24V
 T_start= 31,7 ms @ 48V

TEST 9 - LOAD TRANSIENT STEP RESPONSE

T_step= 7,3 ms 24V @ 1,79A Output Load
 T_step= 6,9 ms 24V @ 3,41A Output Load
 T_step= 6,6 ms 48V @ 1,77A Output Load
 T_step= 6,7 ms 48V @ 3,45A Output Load

TEST 10 - INRUSH CURRENT

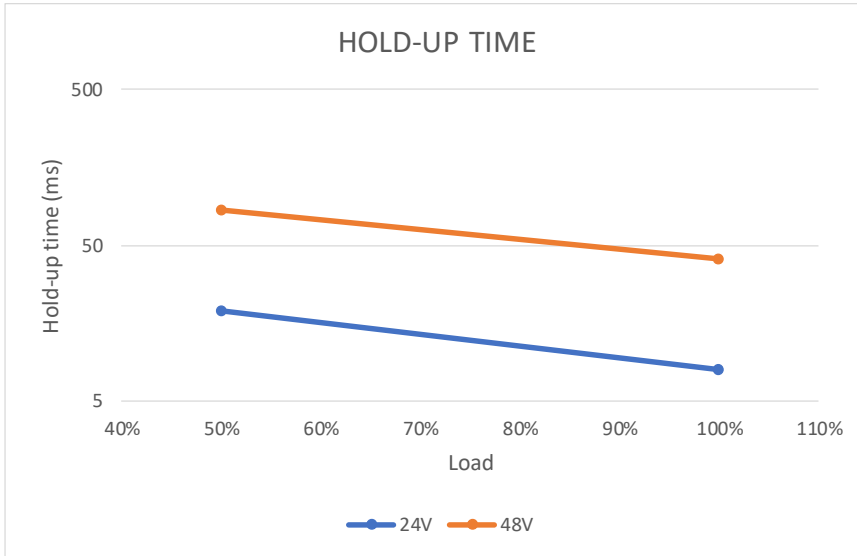
I_inrush = 11,12 A @ 24V
 I_inrush = 21,36 A @ 48V

TEST 11 - HOLD-UP TIME

Raw data

		LOAD	
		50%	100%
INPUT VOLTAGE	24V	18,9	7,9
	48V	84,1	40,7

Chart



NOTES:

ANEXO I – COEFICIENTES t DE STUDENT

Tabela 44. Coeficientes t de Student. Fonte: (G. JUNIOR; SOUZA, 2008)

Graus de liberdade	Faixa de abrangência / probabilidade				
	σ 68,27%	1,96 σ 95%	2,00 σ 95,45%	2,58 σ 99,00%	3,00 σ 99,73%
1	1,837	12,706	13,968	63,656	235,811
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,620
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530
8	1,067	2,306	2,366	3,355	4,277
9	1,059	2,262	2,320	3,250	4,094
10	1,053	2,228	2,284	3,169	3,957
11	1,048	2,201	2,255	3,106	3,850
12	1,043	2,179	2,231	3,055	3,764
13	1,040	2,160	2,212	3,012	3,694
14	1,037	2,145	2,195	2,977	3,636
15	1,034	2,131	2,181	2,947	3,586
16	1,032	2,120	2,169	2,921	3,544
17	1,030	2,110	2,158	2,898	3,507
18	1,029	2,101	2,149	2,878	3,475
19	1,027	2,093	2,140	2,861	3,447
20	1,026	2,086	2,133	2,845	3,422
25	1,020	2,060	2,105	2,787	3,330
30	1,017	2,042	2,087	2,750	3,270